

张津铭,唐华风,雷杭山,等.辽西地区中生界下白垩统义县组火山岩相模式及储层意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2089-2113. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240210.
Zhang Jinming, Tang Huafeng, Lei Hangshan, et al. Volcanic Facies Model and Reservoir Significance of Mesozoic Lower Cretaceous Yixian Formation in Western Liaoning. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2089-2113. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240210.

辽西地区中生界下白垩统义县组 火山岩相模式及储层意义

张津铭¹,唐华风¹,雷杭山²,卞海越¹,贾万丽²,高有峰¹,孙雨颀¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要:岩相模式是火山岩油气藏研究的重要基础,对储层的预测和油气层评价有重要的指导意义。渤海海域中生界火山岩取得了重大突破,随着勘探工作的深入,其他区域的火山岩相模式在本区已不再适用。为了建立渤海海域下白垩统义县组火山岩相模式,为该区火山岩油气藏勘探开发提供依据,本文基于辽宁西部露头地质调查,利用岩矿鉴定、主微量元素分析、粒度分析和面孔率(或面缝率)分析方法,进行岩性、岩相和储层物性的综合研究。结果表明,辽西义县组火山岩就位环境存在陆上和水下两种。根据5相15亚相44微相分类方案,识别出3相5亚相9微相:爆发相,热基浪亚相,包括火山口-近火山口微相、近源微相和远源微相,热碎屑流亚相,包括火山口-近火山口微相;喷溢相,水上熔岩流亚相,包括简单熔岩流微相和复合熔岩流微相,水上喷发水下就位熔岩流亚相,包括复合熔岩流微相和原地碎屑堆积微相;侵出相,水上熔岩穹丘亚相,包括内核微相。储层面孔率(或面缝率)由高到低依次为爆发相、喷溢相和侵出相。热碎屑流亚相火山口-近火山口微相的储层物性优于热基浪亚相火山口-近火山口微相,且前者总面孔率(或面缝率)较大,水上喷发水下就位熔岩流亚相的储层物性优于水上熔岩流亚相。水上喷发水下就位熔岩流亚相原地碎屑堆积微相在所识别出的9种微相里储层最好。爆发相和喷溢相的亚相纵横比中等储层更好。

关键词:火山岩相;储层;面孔率;义县组;下白垩统;辽西

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240210

中图分类号: P586; P618.13

文献标志码: A

Volcanic Facies Model and Reservoir Significance of Mesozoic Lower Cretaceous Yixian Formation in Western Liaoning

Zhang Jinming¹, Tang Huafeng¹, Lei Hangshan², Bian Haiyue¹, Jia Wanli²,
Gao Youfeng¹, Sun Yuqi¹

收稿日期: 2024-09-29

作者简介: 张津铭(2000—),男,硕士研究生,主要从事火山岩相和火山岩储层方面的研究, E-mail: zjm22@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 唐华风(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事火山地层和火山岩储层综合方面的研究, E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

基金项目: 吉林省重点研发项目(20230203107SF); 国家自然科学基金重大项目(41790453)

Supported by the Key Research and Development Project of Jilin Province (20230203107SF) and the Major Project of National Natural Science Foundation of China (41790453)

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: Lithofacies model is an important basis for the study of volcanic oil and gas reservoirs and has important guiding significance for reservoir prediction and oil and gas reservoir evaluation. A major breakthrough has been made in Mesozoic volcanic rocks in Bohai Sea. With the deepening of exploration work, the inapplicability of volcanic facies models in other regions has become prominent in this area. In order to establish the volcanic facies model of Lower Cretaceous Yixian Formation in Bohai Sea, it provides a basis for the exploration and development of volcanic oil and gas in this area. There are abundant outcrop data in western Liaoning. Based on outcrop geological survey, the lithology, lithofacies and reservoir physical properties are comprehensively studied by means of rock and mineral identification, major and trace element analysis, particle size analysis and surface porosity analysis. The results are as follows, there are two kinds of volcanic emplacement environments in the Yixian Formation of western Liaoning Province: onshore and underwater. According to the classification scheme of five facies 15 subfacies 44 microfacies, three facies five subfacies nine microfacies are identified in this study, which are volcanic pyroclastic flow subfacies crater-near crater microfacies, base surge subfacies crater-near crater microfacies, near source microfacies and far source microfacies; Effusive facies subaerial lava flow subfacies simple lava flow microfacies and composite lava flow microfacies, effusive facies subaqueous lava flow subfacies composite lava flow microfacies and autochthonous debris accumulation microfacies; Extrusive facies lava dome above water subfacies core microfacies. From high to low, the reservoir surface porosity is explosive facies, effusive facies and extrusive facies. The physical properties of the volcanic crater-near-volcanic microfacies of the pyroclastic flow subfacies are better than those of the volcanic crater-near-volcanic microfacies of the base surge subfacies, and the total surface porosity is larger. Effusive facies subaqueous lava flow subfacies autochthonous debris accumulation microfacies in nine identified microfacies have the best reservoir. The subfacies aspect ratio of effusive facies and extrusive facies is better than that of small reservoirs.

Key words: volcanic facies; reservoir; surface porosity; Yixian Formation; Lower Cretaceous; western Liaoning

0 引言

随着油气勘探程度的不断提高,火山岩油气藏已然成为重要的勘探领域,近年来,在渤海湾盆地、松辽盆地等均发现了高产油气藏^[1-5]。作为火山岩油气勘探的重要环节,建立火山岩相与地震相之间的关系,并利用地震相解释有利岩相带显得尤为重要,其中火山岩相分类是关键。王璞珺等^[6]将松辽盆地划分成 5 相 15 亚相,此方案在盆地火山中得到了广泛的应用,也衍生出了众多分类方案,如:考虑到岩性的差别,增加了基性溢流相的划分,形成了适用于渤海湾盆地的 6 相 18 亚相分类方案^[7-8],并利用其将准噶尔盆地划分为 4 相 6 亚相^[9];随着火山地层研究的深入,提出了基于火山堆积单元尺度的 5 相 15 亚相 44 微相分类方案^[10],该分类方案有利

于建立火山岩相与岩性-储层的关系^[11]。

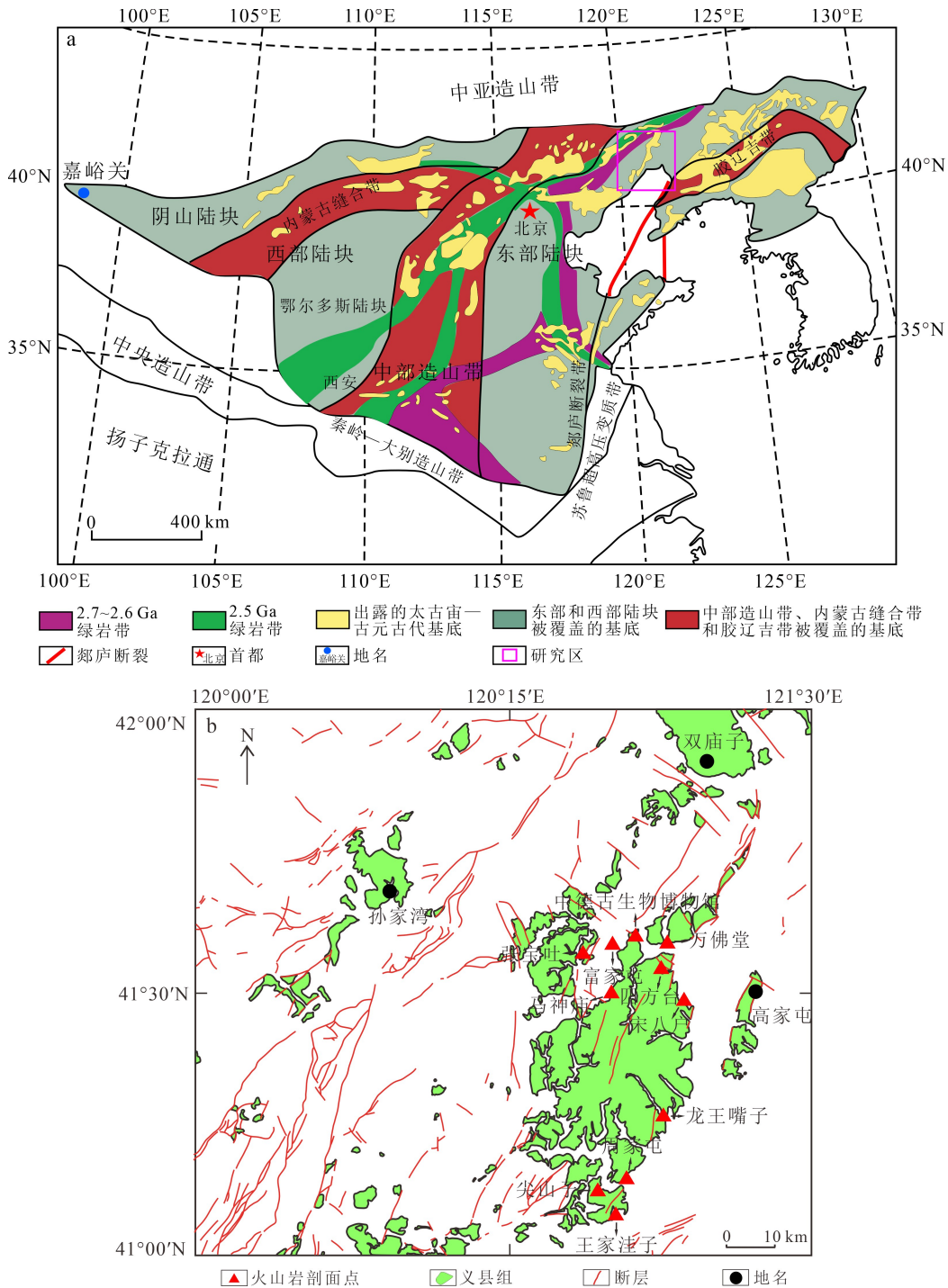
渤海湾盆地中生界火山岩分布范围广,火山岩种类多,包括从基性到酸性熔岩和火山碎屑岩等多种类型,具有广阔的勘探前景^[12-14]。该区域的火山岩油气勘探取得了一系列重大突破^[15-18]。渤海湾盆地义县组中酸性溢流相、爆发相和火山通道相可发育优质储层^[19-23]。盆地内钻井实物资料的限制阻碍了对本区岩相的认识,制约了研究区火山岩地震相岩相-储层的解释精度。幸运的是,渤海湾广泛分布义县组火山岩,为本区火山岩相海陆对比研究提供了物质基础。

本文依据辽西地区露头资料,参照 5 相 15 亚相 44 微相分类方案,利用野外地质调查、岩矿鉴定、地球化学和粒度分析等方法刻画了岩石组构、就位环境和几何外形等参数,建立了岩相模式,开展了岩性

岩相对火山岩油气藏储层物性的影响及意义的研究;以期建立渤海海域义县组火山岩相模式,为渤海海域义县组火山岩油气藏勘探开发提供依据。

1 区域地质概况

辽宁西部位于华北克拉通北缘^[24-25](图1a)燕



a 图据文献[24-25]修编;b 图据脚注①简化修改。

图1 华北克拉通构造简图(a)和研究区地质简图(b)

Fig.1 Schematic diagram of North China craton structure (a) and simplified geological map of the study area (b)

①黄志安.辽宁省1:25万地质图.沈阳:中国地质调查局沈阳地质调查中心,2004.

山陆内造山带东段,是中国中生代地质研究的热门地区。辽西地区义县组遍布中生代火山岩(图 1b),发育中小型火山-盆地^[26-27]。早白垩世的构造岩浆活动使得辽西地区形成了大规模的火山喷发,导致义县组火山岩形成于太平洋板块向欧亚大陆俯冲后的伸展环境^[28-29]。辽西地区中生代火山活动从侏罗纪一直持续到白垩纪,其中下白垩统义县组作为中国中生代陆相地层最重要的组成部分,火山活动最为强烈,火山地层分布最为广泛^[30]。研究区内宋八户、四方台、马神庙等野外实测剖面均处于辽西义县组,主要岩性多为基性、中性、酸性熔岩和火山碎屑(熔)岩。火山机构相带与野外实测剖面有较好的映射关系,如:尖山地区剖面具有冲刷面的特征;万佛堂地区剖面呈楔状,具有纵横比中等的特征;古生物博物馆地区剖面产状较为平缓,发育正断层,表面明显的分界线将该剖面分为上部和下部,其中龙王嘴子剖面具有扇状、纵横比中等的特征。中生代辽西地区义县组整个火山活动阶段具有从基性一中基性一中性一中酸性的完整喷发序列的现象^[31],义县组内各个火山旋回之间存在沉积层隔离^[32],可将义县组划分为 4 个旋回^[33-35]。沉积夹层中产典型的热河生物群化石,如葫芦岛新台门地区义县组沉积夹层中产蝶螈类化石,化石层位位于火山岩之上,同时在更高层位产昆虫、叶肢介和植物等化石^[36-37]。义县组早期岩性主要以各种火山碎屑岩为主,爆发相占优,晚期为各类熔岩、喷溢相占优^[38]。将辽西地区义县组的岩石组合总体进行对比分析可发现其共性,但其也存在一定的分异性,例如阜新盆地火山岩地层发育较其他盆地更为完整且厚度更大^[39]。辽西地区义县组火山岩年龄范围在 135~120 Ma 之间,集中在 125~120 Ma^[40-42],处于中国东部中生代岩浆作用的高峰期,该年龄范围也被认为是中国东北地区早白垩世大规模岩浆活动结束的年龄,反映辽西义县组火山岩的形成时代与中国东部中生代强烈的岩浆作用时期吻合^[43-44]。

2 岩石类型和特征

2.1 岩石类型

辽西地区义县组火山岩岩石类型有火山碎屑岩、火山碎屑熔岩和熔岩。

2.1.1 火山碎屑岩类

本研究区火山碎屑岩以集块岩、火山角砾岩、火山角砾凝灰岩和凝灰岩为主。集块岩为灰黑色,火

山碎屑结构,块状构造;集块呈棱角和次棱角状,成分主要为凝灰岩,粒径范围在 64~128 mm 之间,分选差,剖面上部分集块岩由于风化作用脱落,形成空洞(图 2a)。针对集块开展偏光显微镜下鉴定工作,可见黑云母和斜长石斑晶,基质为具显微晶质结构的细针柱状斜长石(图 2b)。

火山角砾岩为灰黑色、灰白色和少部分浅红色,火山碎屑结构,块状构造;角砾呈棱角状、次棱角状和弧面圆形状,成分主要为凝灰岩,粒径范围在 2~64 mm 之间,风化程度中等,角砾被细小火山碎屑物及火山灰等物质胶结,具有正粒序层理(图 2c)。针对角砾开展偏光显微镜下鉴定工作,可见破碎状长石斑晶,晶屑具有熔蚀现象(图 2d)。

火山角砾凝灰岩为黄色和浅灰色,火山碎屑结构,块状构造;角砾呈棱角状和次棱角状,对称粒序层理(图 2e),自上而下粒度显示出粗一细一粗的层理变化。针对角砾凝灰岩开展偏光显微镜下鉴定工作,可见黑云母、石英,其次为少量角闪石斑晶,近平行消光,具有暗化边结构,斑晶矿物边缘基质具有绕晶流动的特点。存在蚀变现象,暗色矿物发生绿泥石化(图 2f)。

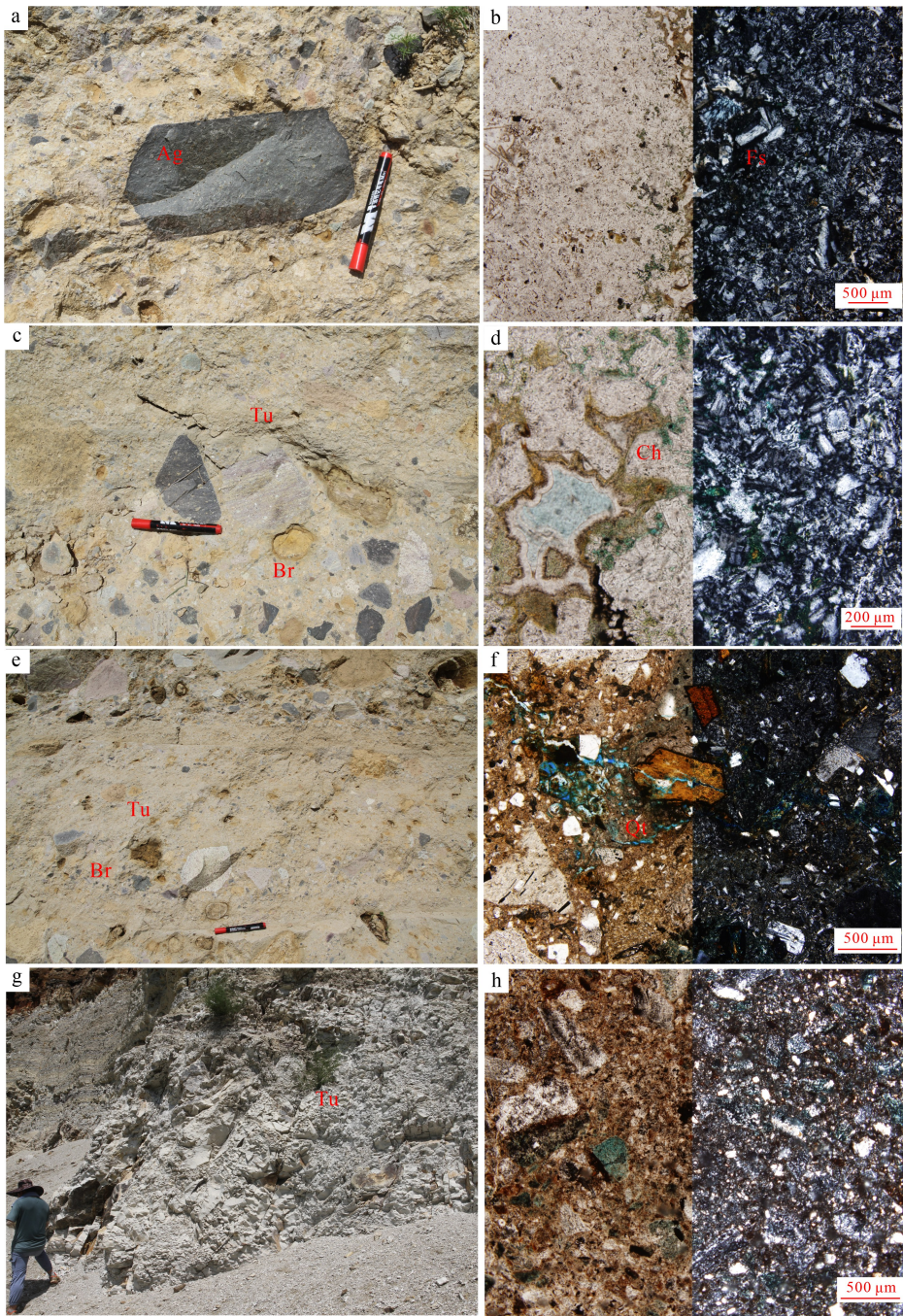
凝灰岩为白色和浅灰色,晶屑凝灰结构,块状构造;颗粒呈次棱角状,火山尘胶结(图 2g),中部凝灰岩与沉积岩相互夹层,粒径范围在 0~2 mm 之间,粒径占比中等。针对凝灰开展偏光显微镜下鉴定工作,可见石英、斜长石和少量黑云母斑晶,存在少量岩屑,并伴随绿泥石化现象(图 2h)。

2.1.2 火山碎屑熔岩类

本研究区火山碎屑熔岩以安山质角砾熔岩、流纹质角砾凝灰熔岩和流纹质凝灰熔岩为主。安山质角砾熔岩为紫红色,边部红色氧化,块状构造;岩石表面存在微小气孔(图 3a)。针对角砾熔岩开展偏光显微镜下鉴定工作,可见长石(体积分数为 15%)和黑云母斑晶(体积分数为 10%),基质具有隐晶质特点,岩屑主要为安山岩岩屑(图 3b)。

流纹质角砾凝灰熔岩为灰黄色,凝灰结构;风化严重,裂隙发育,胶结物主要为熔浆,岩石表面被角砾充填,部分角砾脱落形成气孔(图 3c)。针对角砾凝灰熔岩开展偏光显微镜下鉴定工作,可见石英(体积分数为 15%)和黑云母斑晶(体积分数为 5%),发育直径为 0.1~0.4 mm 的气孔(图 3d)。

流纹质凝灰熔岩新鲜面为黄褐色,风化面为浅黄色,熔结凝灰结构,块状构造;岩石胶结成分为火



a. 宋八户露头块状集块岩,部分集块脱落成洞;b. 集块岩镜下照片,基质主要为斜长石;c. 宋八户露头火山角砾岩,具有正粒序层理;d. 火山角砾岩镜下照片,具有晶屑熔蚀现象;e. 宋八户露头火山角砾凝灰岩,具有对称粒序层理;f. 火山角砾凝灰岩铸体照片,暗色矿物具有绿泥石化现象;g. 中德古生物博物馆露头凝灰岩,表面被火山尘胶结;h. 凝灰岩镜下照片,具有绿泥石化现象。b、d、f、h 图中,左图为单偏光,右图为正交偏光。Ag. 集块;Br. 角砾;Tu. 凝灰;Ch. 绿泥石;Fs. 长石;Qt. 石英。

图 2 辽西地区白垩统义县组火山碎屑岩岩性特征

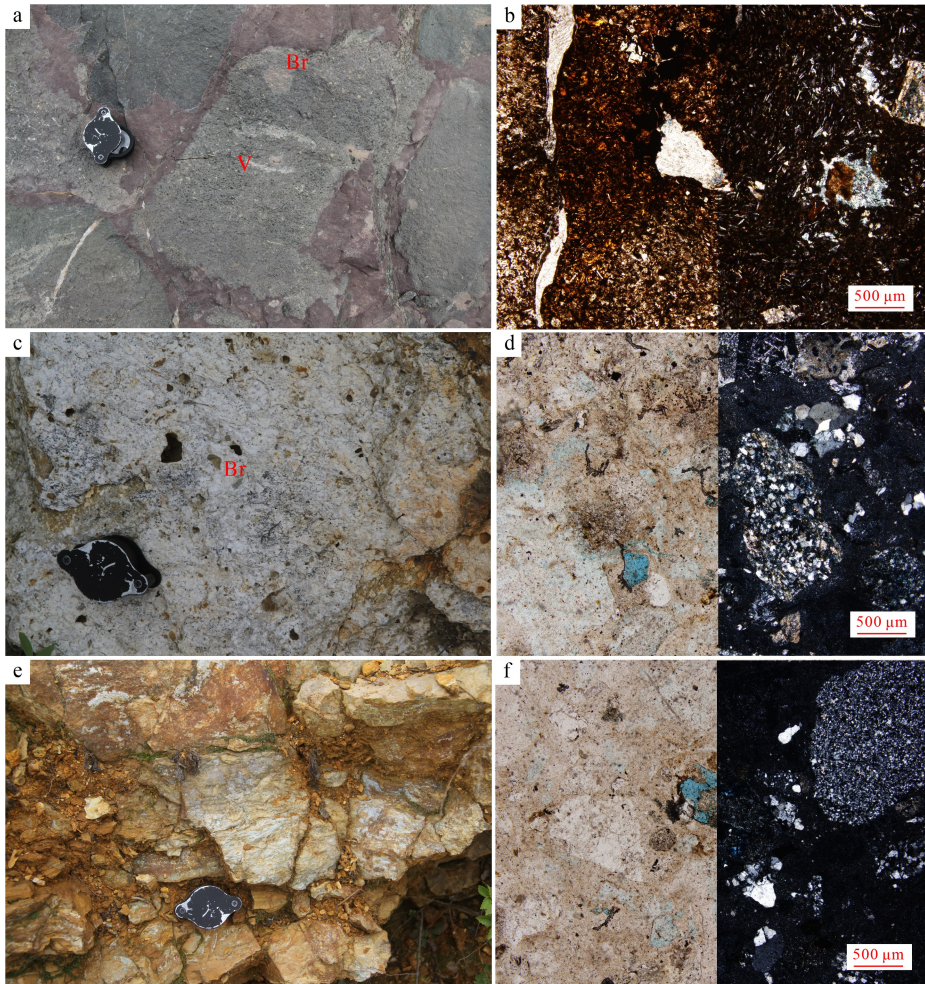
Fig.2 Lithological characteristics of pyroclastic rocks of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

山尘物质,发育不规则节理(图 3e)。针对凝灰熔岩开展偏光显微镜下鉴定工作,可见直径 0.05~0.30 mm 气孔和熔岩斑晶,斑状结构,晶屑成分以石英为主,体积分数约为 5%,具有波状消光特点(图

3f)。

2.1.3 熔岩类

本研究区熔岩以玄武安山岩、安山岩、粗面岩、气孔流纹岩和玻质碎屑岩为主。玄武安山岩为黑色



a. 尖山露头安山质角砾熔岩, 表面发育微小气孔; b. 安山质角砾熔岩铸体照片, 基质多为隐晶质, 岩屑为安山质; c. 马神庙露头流纹质角砾凝灰熔岩, 部分角砾脱落形成气孔; d. 流纹质角砾凝灰熔岩铸体照片, 可见气孔发育; e. 马神庙露头流纹质凝灰熔岩, 表面被火山尘胶结, 发育不规则节理; f. 流纹质凝灰熔岩铸体照片, 石英具有波状消光特点。b、d、f 图中, 左图为单偏光, 右图为正交偏光。V. 气孔; Br. 角砾。

图 3 辽西地区白垩系义县组火山碎屑熔岩岩性特征

Fig.3 Lithology characteristics of pyroclastic lava of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

和灰黑色, 致密块状结构, 呈球状、枕状和不规则状(图 4a), 半径为 0.1~1.5 m; 岩石表面存在自碎集块和角砾, 粒径为 20~200 mm。针对玄武安山岩开展偏光显微镜下鉴定工作, 镜下可见斑状结构, 斑晶主要由斜长石和黑云母构成, 基质为隐晶质, 具交织结构(图 4b)。

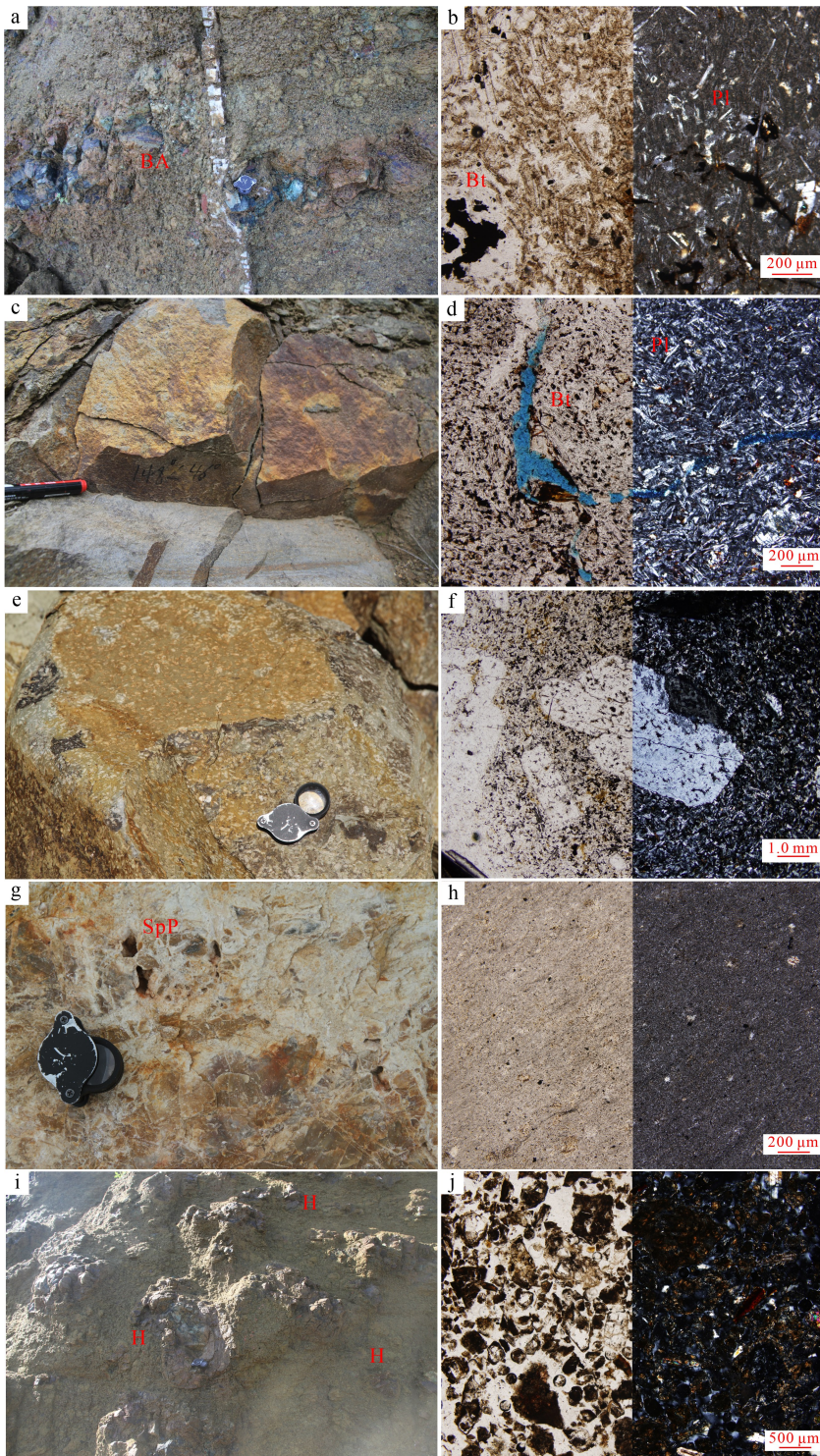
安山岩为浅黄色和浅褐色, 块状结构; 表面风化, 存在不规则节理(图 4c)。针对安山岩开展偏光显微镜下鉴定工作, 可见斜长石斑晶(体积分数为 5%)和暗化黑云母(体积分数为 15%), 斜长石长条状微晶部分定向分布, 具交织结构(图 4d)。

粗面岩为褐灰色和褐红色, 块状结构; 岩石表面风化(图 4e), 冷凝收缩缝和构造缝较为发育。针对

粗面岩开展偏光显微镜下鉴定工作, 可见斑状结构, 斑晶体积分数高达 30%, 斑晶多为碱性长石, 基质以微晶透长石为主(图 4f)。

气孔流纹岩为浅黄色和红褐色, 流纹构造; 表面可见由溶蚀作用形成的气孔(图 4g), 气孔直径为 2~10 mm, 岩石整体风化严重。针对流纹岩开展偏光显微镜下鉴定工作, 可见含量较少的斑晶, 多为石英(图 4h), 基质为霏细质-隐晶质。

玻质碎屑岩为浅黄色, 火山角砾结构(图 4i), 堆砌构造; 颗粒多为棱角状, 粒径范围在 2~8 mm 之间。针对玻质碎屑岩开展偏光显微镜下鉴定工作, 可见斜长石、石英以及角闪石等安山质矿物。此外, 还可观察到一定量的玻屑, 整体上是由蚀变较为强



a. 四方台露头玄武安山岩,为球状、枕状和不规则状;b. 玄武安山岩镜下照片,基质具交织结构;c. 富家屯露头安山岩,发育不规则节理;d. 安山岩铸体照片,斜长石具有交织结构;e. 中德古生物博物馆露头粗面岩,表面风化;f. 粗面岩镜下照片,基质多为微晶透长石;g. 马神庙露头气孔流纹岩,发育溶蚀孔;h. 气孔流纹岩镜下照片,斑晶多为石英;i. 四方台露头玻质碎屑岩,具有火山角砾结构;j. 玻质碎屑岩镜下照片,玻屑中胶结充填细碎屑。b、d、f、h、j,左侧为单偏光,右侧为正交偏光。BA, 玄武安山岩;Bt, 黑云母;Pl, 斜长石;SpP, 溶蚀孔;H, 玻质碎屑岩。

图 4 辽西地区白垩系义县组熔岩岩性特征

Fig.4 Lithologic characteristics of lava of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

烈的玻璃质熔岩和斜长石晶屑组成,并被细碎屑胶结充填(图 4j)。

选取辽西地区义县组 23 件较为新鲜的火山岩样品进行全岩分析,结果(表 1)表明 SiO_2 质量分数为 49.57%~79.94%, Al_2O_3 质量分数为 12.11%~22.52%, TiO_2 质量分数为 0.23%~1.89%, Fe_2O_3 质量分数为 0.59%~8.81%, FeO 质量分数为 0.04%~2.34%, CaO 质量分数为 0.20%~5.93%, MgO 质量分数为 0.23%~4.40%, K_2O 质量分数为 0.71%~6.52%, Na_2O 质量分数为 0.04%~7.66%, MnO 质量分数为 0.01%~0.44%, P_2O_5 质量分数为 0.04%~0.79%,烧失量为 0.98%~6.48%。

将火山岩样品实验所得的 SiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 质量分数数据进行火山岩 TAS 图解投图分析,结果(图 5)表明,辽西义县组发育流纹岩、英安岩、粗面英安岩、粗面岩、粗面安山岩、玄武岩质粗面安山岩和粗面玄武岩。

2.2 岩性构成特征

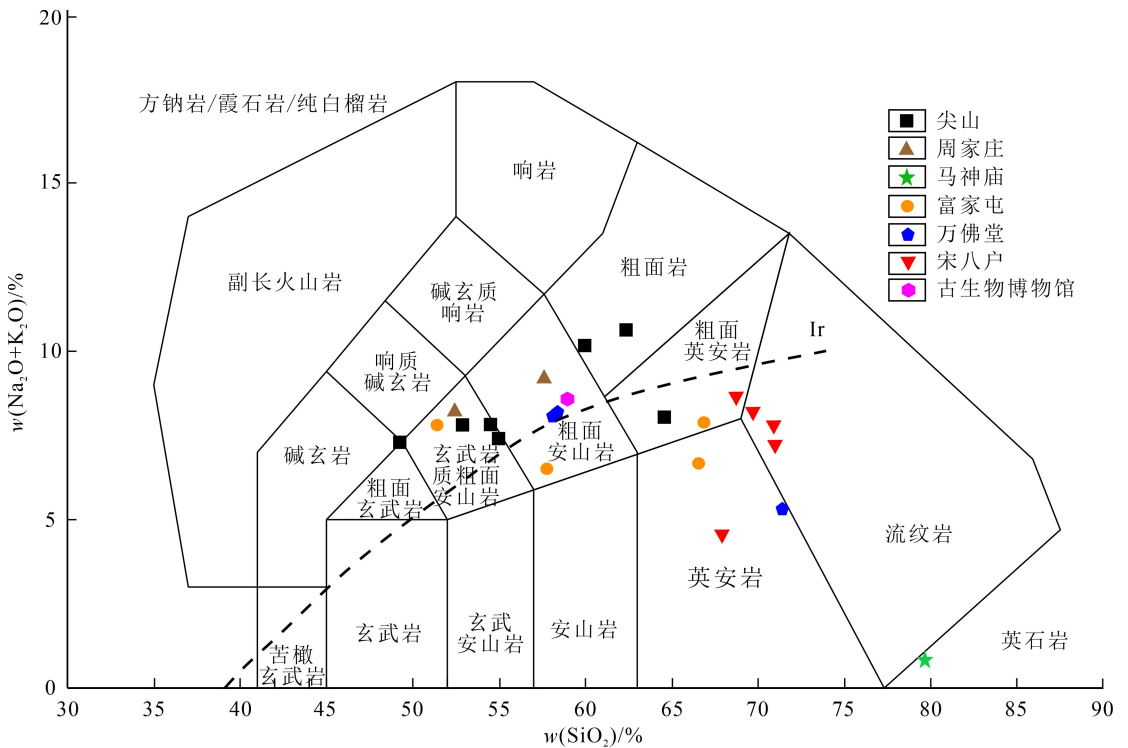
根据岩石成分和结构特征,识别出 4 类 11 型火山岩,具体为:熔岩,占比高达 67%,主要包括玄武岩、安山岩、粗安岩、英安岩和流纹岩;沉火山碎屑岩,占比为 20%,主要包括沉凝灰岩和沉角砾岩;火山碎屑岩,占比为 12%,包括凝灰岩、角砾岩和集块岩;火山碎屑熔岩,仅占 1%,多为凝灰熔岩。按化学成分分析不难发现,研究区主要发育中性熔岩和

表 1 辽西地区义县组火山岩样品主量元素分析数据

Table 1 Major element analysis data of volcanic rock samples from Yixian Formation in western Liaoning

样品号	$w_B/\%$											LOI/%
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5	
JSZ-1	59.91	16.54	0.69	5.41	0.36	1.89	1.30	2.51	7.61	0.06	0.25	3.23
JSZ-3	62.50	17.41	0.69	6.33	0.04	0.27	0.47	2.81	7.66	0.05	0.05	1.49
JSZ-4	64.63	15.59	0.79	5.60	0.23	0.66	1.00	2.67	5.25	0.08	0.09	3.20
JSZ-8	52.94	16.08	1.38	6.91	2.13	3.91	4.33	1.84	5.96	0.13	0.44	3.49
JSZ-9	54.79	15.67	1.43	6.49	1.90	3.75	4.40	2.13	5.68	0.08	0.26	2.99
JSZ-10	54.99	15.40	1.50	7.35	1.60	3.33	4.21	2.04	5.34	0.09	0.31	3.42
JSZ-12	49.57	18.69	1.57	8.81	0.68	4.69	1.89	3.53	3.70	0.44	0.47	5.62
ZJZ-1	52.25	14.23	1.78	7.16	2.34	5.93	4.00	3.11	5.06	0.17	0.79	2.66
ZJZ-2	57.71	14.86	1.89	7.39	1.09	4.08	2.14	2.09	7.02	0.13	0.31	0.98
MSM-8	79.94	12.98	0.23	0.59	0.08	0.24	0.23	0.71	0.04	0.01	0.10	4.74
FJT-1	57.90	17.03	0.81	5.33	1.94	4.30	2.73	2.62	3.93	0.10	0.31	2.57
FJT-4	66.43	16.39	0.69	4.73	0.37	0.20	0.64	3.94	2.77	0.04	0.10	3.51
FJT-5	66.86	18.10	0.37	1.94	0.63	0.26	0.43	6.52	1.27	0.01	0.09	3.20
FJT-6	51.47	22.52	0.87	7.21	0.50	0.91	1.55	5.81	1.99	0.20	0.23	6.48
WFT-1	71.45	12.11	0.77	2.45	0.79	1.55	1.08	2.86	2.44	0.07	0.10	4.06
WFT-2	58.40	18.73	1.54	2.33	2.05	5.18	1.15	3.42	4.77	0.07	0.35	1.53
WFT-3	58.37	18.90	1.49	2.38	1.93	5.21	1.08	3.36	4.77	0.07	0.32	1.64
SBH-1	67.93	14.66	0.76	3.65	0.75	1.05	1.46	2.58	1.99	0.06	0.04	4.83
SBH-2	70.93	15.35	0.40	1.69	0.19	1.22	0.51	4.41	3.43	0.02	0.04	1.60
SBH-3	71.09	14.90	0.40	1.73	0.24	1.14	0.64	4.08	3.11	0.02	0.04	2.38
SBH-4	68.75	15.28	0.38	1.72	0.38	1.61	0.56	4.56	4.10	0.03	0.08	2.28
SBH-5	69.79	14.39	0.45	1.83	0.37	1.82	0.57	4.21	4.01	0.03	0.10	2.17
GSW-2	58.90	18.80	1.53	4.35	0.49	4.48	0.88	3.42	5.16	0.07	0.24	1.36

注:LOI.烧失量。



底图据文献[45-46]。Ir.钙碱性与碱性的分界线。

图 5 辽西地区白垩统义县组 TAS 图解

Fig.5 TAS diagram of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

酸性熔岩,二者在熔岩中占比为 97%,基性岩占比为 3%。在目前钻井所揭示的岩性中,中酸性岩含油气性较好,同时其也是火山岩油气勘探的重要组成部分,表明该地区具有良好的储层潜力(图 6)。

2.3 火山岩就位环境特征

火山岩就位环境是火山岩岩相类型发育的关键因素,基于目前的地球化学手段,可用主量元素和微量元素判别岩石就位环境^[47-50]。作为指示火山岩就位环境的关键地球化学指标,火山岩氧化系数(OX)(Fe₂O₃质量分数与 Fe₂O₃+FeO 质量分数的比值)对氧化、还原环境的判别效果较好,其中 OX 值高代表水上喷发(强氧化环境),OX 值低代表水下喷发(强还原环境),中间范围为水上喷发(弱氧化-弱还原环境)^[51]。故本文根据火山岩氧化系数定性分析研究区内的火山岩就位环境。

刘德成等^[52]人为减少了不同化学成分火山岩 Fe 质量分数自身的差异性,从多方面综合考虑了火山岩浆性质、风化溶蚀和充填作用等因素对火山岩氧化系数的影响,在判别图解中加入了 SiO₂ 质量分数作为参数,使得火山岩就位环境图版有了更为准确的判别效果;因此本文通过此图解对辽西义县组

23 件火山岩样品的喷发就位环境进行判别。从各个指标的计算结果可以看出,辽西义县组 23 组火山岩样品火山岩氧化系数范围介于 1.04~3.34 之间。将数据进行投图(图 7)可见,辽西义县组 23 件火山岩样品的喷发就位环境均为水上喷发。由于四方台地区的岩石样品风化较为严重,没有做主微量元素分析测试,但通过野外观察发现该地区具有淬火结构的玻质碎屑岩(图 4i),熔岩流纵横比较小,同时显微镜下发现玻璃质熔岩岩屑(图 4j),而玻质碎屑岩和玻璃质结构作为判别水下就位的重要依据,故四方台地区出露的火山岩就位环境为水上喷发水下就位。

3 岩相模式和岩相类型

系统岩相类型分类是火山岩油气勘探的重要基础,对储层的预测和评价有着重要的指示意义^[53-57]。基于 5 相 15 亚相 44 微相划分方案^[10],在辽西义县组识别出 3 相 5 亚相 9 微相,结果见表 2。

3.1 爆发相

3.1.1 热基浪亚相

热基浪^[58]为大陨石撞击地面或爆裂式火山喷

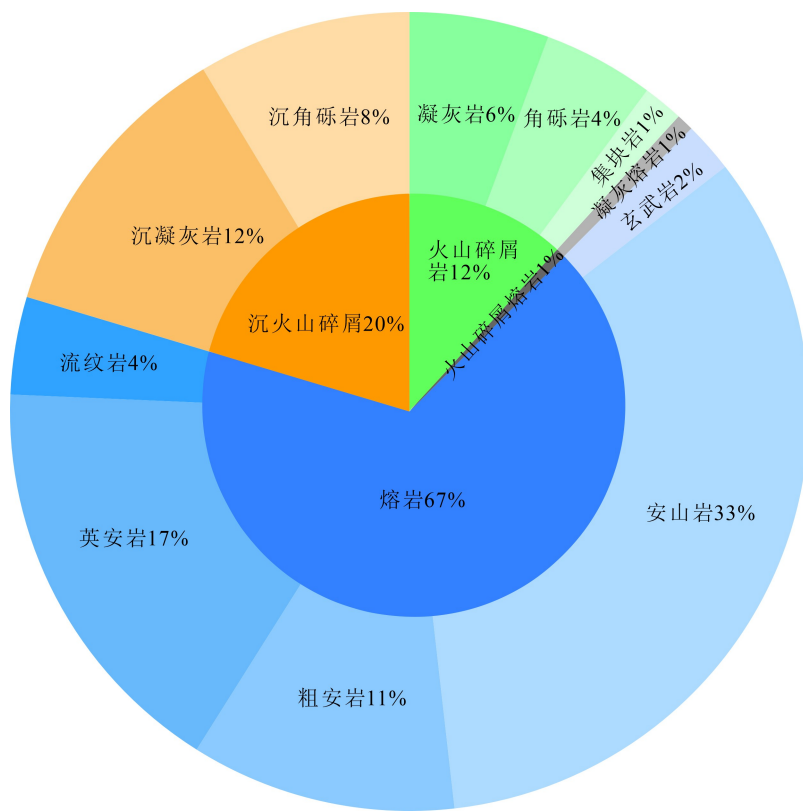


图 6 辽西地区白垩系义县组火山岩岩性分类饼状图^[26]

Fig.6 Pie chart of lithologic classification of volcanic rocks of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning^[26]

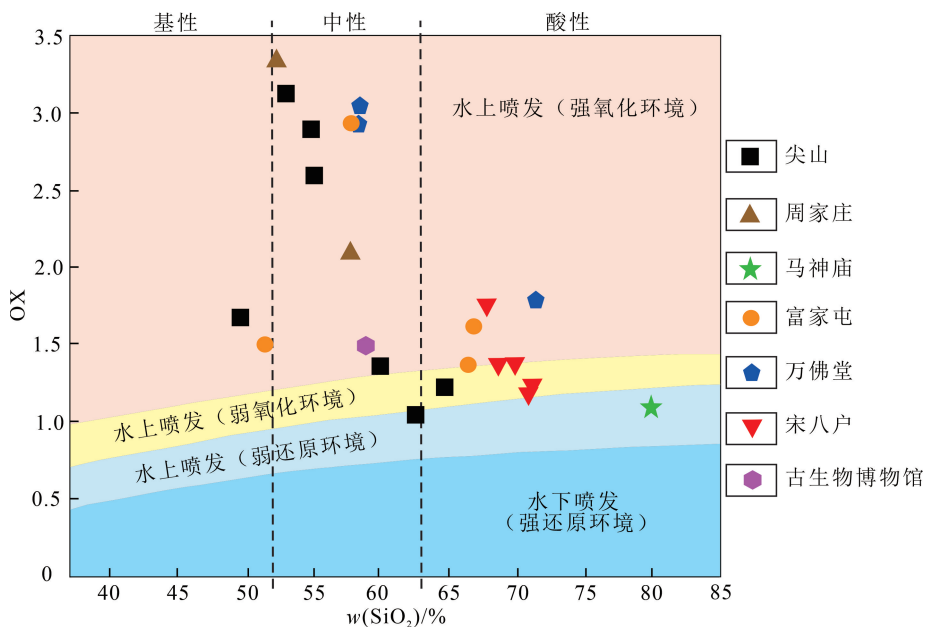


图 7 辽西地区白垩系义县组火山岩就位环境判别图解^[52]

Fig.7 Diagram for determining emplacement environment of volcanic rocks of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning^[52]

表 2 辽西地区白垩系义县组火山岩相分类表^[10]

Table 2 Classification of volcanic facies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning^[10]

相	亚相	微相	特征岩性和组构
爆发相	热基浪	火山口-近火山口	火山集块岩、角砾岩和凝灰岩,弹道状火山坠石;流槽构造;粒序层理、波状层理、交错层理
		近源	火山角砾岩、角砾凝灰岩和凝灰岩;流动构造;平行层理、交错层理或粒序层理
		远源	凝灰岩;平行层理、水平层理或粒序层理
	热碎屑流	火山口-近火山口	块状强熔结集块岩、角砾岩和凝灰岩,弹道状火山坠石
喷溢相	水上熔岩流	简单熔岩流	层状叠置熔岩;从下至上可出现管状气孔-致密块状-气孔密集的组构序列;柱状节理,冷凝收缩缝
		复合熔岩流	交错叠置熔岩;从下至上可出现管状气孔-致密块状-气孔密集的组构序列;柱状节理,冷凝收缩缝
	水上喷发水下就位熔岩流	复合熔岩流 原地碎屑堆积	交错叠置熔岩 玻质碎屑岩、自碎角砾岩;块状构造、前积构造
侵出相	水上熔岩穹丘	内核	熔岩;上部不规则柱状节理,中下部规则柱状节理

注:隐爆角砾岩是各类岩性在火山口-近火山口的次生岩石类型,存在穿时现象,为了突出储层意义将其划分为微相级别;由于隐爆角砾岩发育存在不确定性,未在表中列出。

发时(以及核爆炸和化学爆炸时),从爆炸点或撞击坑飞溅出速度较低的环形热气云、熔融碎屑岩和尘埃等喷射物,像密度流一样向外作辐射状运动(速度可高达 200 km/h)的一种现象。

根据野外剖面实测,在辽西王家洼子地区发现热基浪亚相并进一步识别出 3 个微相,分别是火山口-近火山口、近源和远源微相。火山口-近火山口微相发育火山集块岩、角砾岩和少量凝灰岩,其中角砾岩占比较大;近源微相发育火山角砾岩、角砾凝灰岩和凝灰岩;远源微相发育平行层理的凝灰岩。自火山口到远源主要表现为粒度变小和熔结程度变小(图 8a)。

对王家洼子地区岩石样品和镜下薄片进行粒度分析,结果显示:火山口-近火山口微相的火山集块岩(图 8b)集块直径为 64~256 mm,角砾直径以 2~8 mm 为主,凝灰直径以 1~2 mm 为主,集块体积较大,角砾较多,该微相颗粒较粗,分选系数为 2.5,分选中等;近源微相的角砾凝灰岩(图 8c)角砾直径以 2~4 mm 为主,凝灰直径以 $6.25 \times 10^{-2} \sim 0.125$ mm 和 0.125~0.250 mm 为主,角砾占比与集块岩相比减少,颗粒粗细中等,分选系数为 2.3,分选中等偏好;远源微相的凝灰岩(图 8d)凝灰直径以 $1.5625 \times 10^{-2} \sim 0.125$ mm 为主,颗粒较细,部分颗粒在搬运过程中发生破碎,分选系数为 2.1,分选较好。

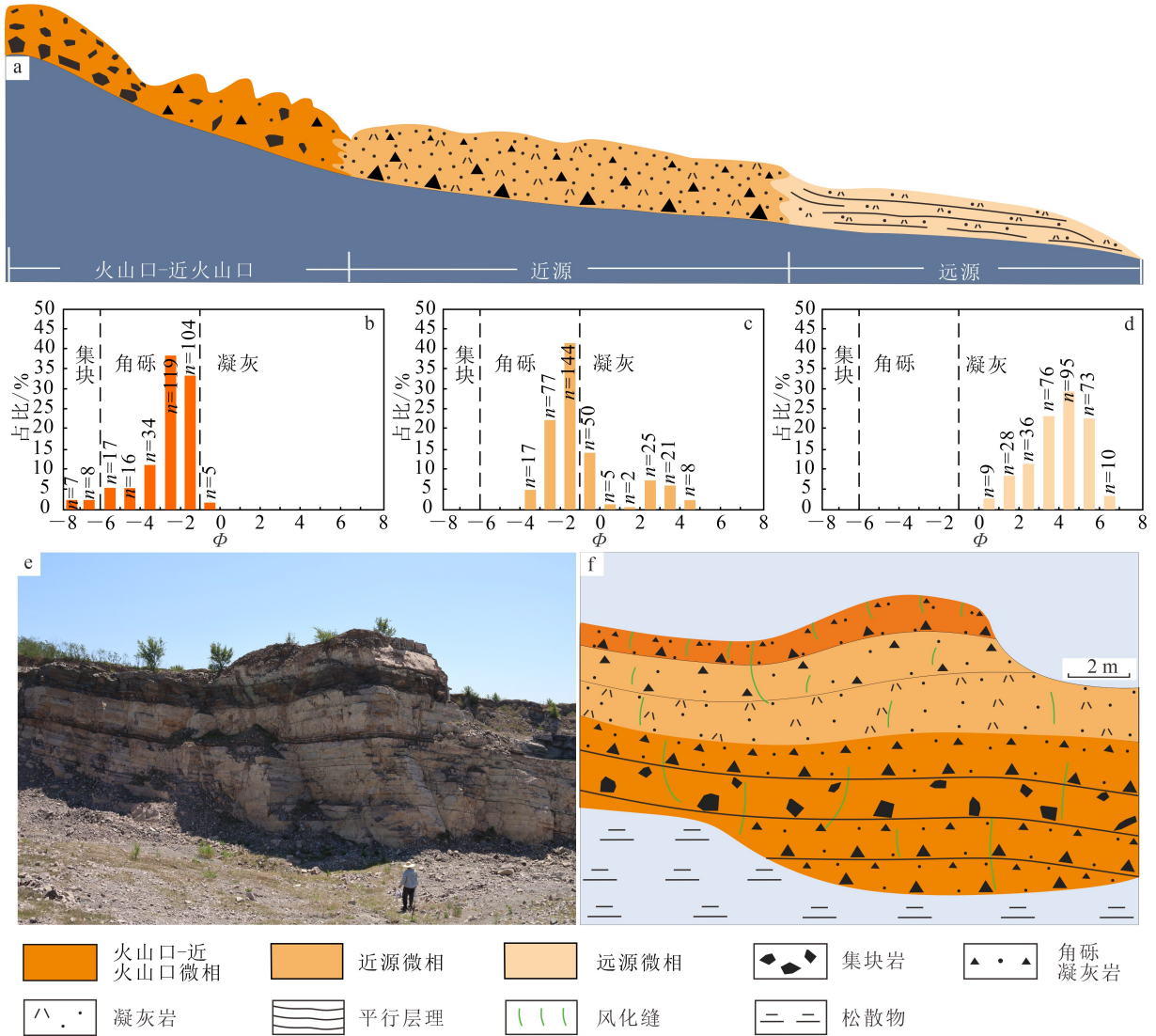
王家洼子地区露头发现的爆发相热基浪亚相的岩性以流纹质集块岩、角砾岩和凝灰岩为主,具有弱

熔结结构。剖面整体纵横比较小,发育风化缝,角砾含砾较多。剖面下部发育平行层理的集块岩、角砾凝灰岩和凝灰岩,厚度数余米。具有正粒序层理,粒度由细逐渐变粗(图 8e、f)。

3.1.2 热碎屑流亚相

热碎屑流通常是指火山碎屑物和火山喷发时所产生的气体经过高温作用所形成的密度流^[59],多为富含火山碎屑分散物质和动能的火山碎屑密度流^[60-61],在沉积相中通常表现为陆相。

按距离火山口的位置、岩石组构和几何外形等特点,一般可将热碎屑流亚相分为 3 个微相,分别是火山口-近火山口、近源和远源微相(图 9a)。火山口-近火山口微相发育块状具有强熔结结构的集块岩、角砾岩和凝灰岩,其中角砾岩占比较大,该微相横截面多为纵横比较大的丘状;近源微相为交错层理发育/流动构造发育的熔结角砾岩和凝灰岩;远源微相为平行层理发育的熔结凝灰岩。由火山中心向边缘底部主要表现为粒度变小和熔结程度变小。但由于在宋八户地区野外实测没有发现近源和远源微相,故本文仅讨论在本区发现的火山口-近火山口微相。对火山口-近火山口微相处的岩石样品(图 9b)进行粒度分析,结果(图 9c)显示火山口-近火山口微相的火山集块岩集块直径为 64~128 mm,角砾直径以 2~8 mm 为主,凝灰粒径以 1~2 mm 为主,角砾占比较高,集块体积较大,该微相颗粒较粗,分



a. 热基浪亚相模式示意图^[10]; b. 王家洼子地区热基浪亚相火山口-近火山口微相火山集块岩粒度分布直方图; c. 王家洼子地区热基浪亚相近源微相角砾凝灰岩粒度分布直方图; d. 王家洼子地区热基浪亚相远源微相凝灰岩粒度分布直方图; e. 王家洼子地区热基浪亚相野外剖面; f. 王家洼子地区热基浪亚相宏观结构素描图,发育正粒序层理,粒度由细逐渐变粗。 Φ 为粒度, $\Phi = -\log 2D$, D 为颗粒直径(mm)。n为样品数。下同。

图 8 辽西地区白垩系义县组爆发相热基浪亚相模式图

Fig.8 Architecture of explosive facies base surge subfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

选系数为 2.7,分选中等。

宋八户地区露头发现的爆发相热碎屑流亚相火山口-近火山口微相岩性以具有强熔结结构的中酸性集块岩、角砾岩和流纹质凝灰岩为主,表面发育风化脱落孔(图 9d)。剖面存在直径为 10~150 mm 的风化脱落孔,可能是由于风化淋滤作用导致的岩石脱落而形成的。宋八户地区发现以热碎屑流亚相火山口-近火山口微相搭成的格架和靠近火山喷出

口的岩相特征。剖面纵横比中等,发育逆粒序层理,自上而下粒度由粗逐渐变细(图 9e),前缘部分存在正断层现象,底部有松散物。

3.2 喷溢相

喷溢相多指流动性较好的熔岩所构成的熔岩流堆积单元,本研究区共识别出水上熔岩流和水上喷发水下就位熔岩流两种亚相,并进一步识别出四种微相。

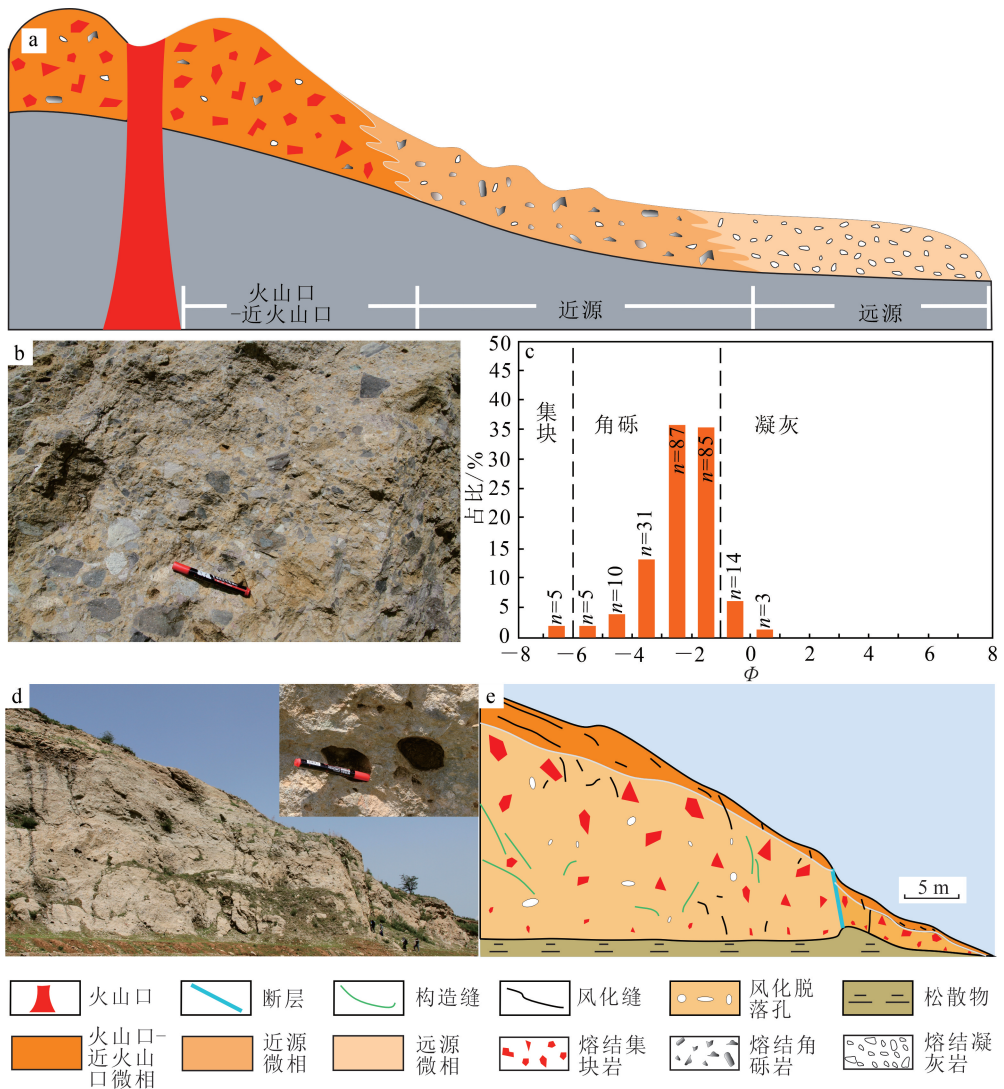


图 9 辽西地区白垩统义县组爆发相热碎屑流亚相模式图
 a. 热碎屑流亚相模式示意图^[10]; b. 宋八户地区热碎屑流亚相火山口-近火山口微相样品采集剖面; c. 热碎屑流亚相火山口-近火山口微相纹质凝灰岩粒度分布直方图; d. 宋八户地区热碎屑流亚相火山口-近火山口微相野外剖面, 表面发育风化脱落孔; e. 热碎屑流亚相火山口-近火山口微相宏观结构素描图, 发育逆粒序层理, 自上而下粒度由粗逐渐变细。

图 9 辽西地区白垩统义县组爆发相热碎屑流亚相模式图

Fig.9 Architecture of explosive facies pyroclastic flow subfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

3.2.1 水上熔岩流亚相

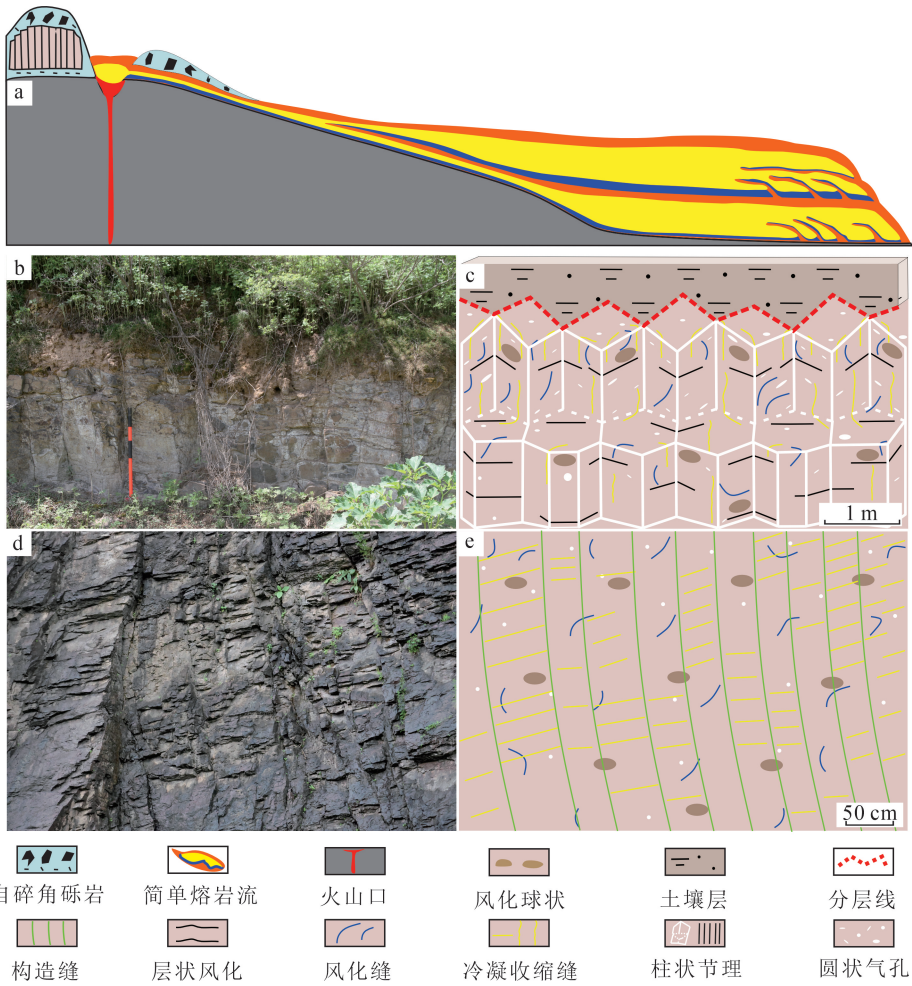
1) 简单熔岩流微相

简单熔岩流又称板状熔岩流, 是由火山口连续喷发火山岩浆等火山物在经冷凝固结作用后所形成的火山地层, 主要以片状熔岩有序叠置为主, 顶部通常存在由自碎角砾岩所形成的原地碎屑堆积微相(图 10a)。本研究区简单熔岩流气孔带厚度小, 气孔与规则冷凝收缩缝和柱状节理相互组合。

万佛堂地区识别出的岩性为气孔玄武岩, 岩相为简单熔岩流微相。熔岩表面均发育由风化作用改造后形成的冷凝收缩缝, 气孔分布较为密集, 多为规

则状, 少部分为不规则状气孔, 直径为 0.2 ~ 5.0 mm, 少量气孔被裂缝连通。剖面存在明显的分层线, 上部土壤层厚度为 20 ~ 30 cm, 中部是风化溶蚀带和风化裂缝带, 下部发育规则的柱状节理、层状及球状风化、冷凝收缩缝、气孔和少量风化缝(图 10b,c), 剖面整体纵横比中等。

龙王嘴子地区识别出的岩性为流纹岩, 岩相为简单熔岩流微相, 可在剖面上观察到从上到下逐渐减弱的风化缝和球状风化, 存在气孔稀疏带, 沿裂缝定向排列, 表面可见冷凝收缩缝和近直立的构造缝发育(图 10d,e)。



a. 模式示意图,以片状熔岩有序叠置为主^[10]; b. 万佛堂地区野外剖面,顶部发育土壤层,下部发育柱状节理; c. 万佛堂地区宏观结构素描图; d. 龙王嘴子地区野外剖面,表面发育近直立的构造缝; e. 龙王嘴子地区宏观结构素描图。

图 10 辽西地区白垩系义县组喷溢相水上熔岩流亚相简单熔岩流微相模式图

Fig.10 Architecture of effusive facies subaerial lava flow subfacies simple lava flow microfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

2) 复合熔岩流微相

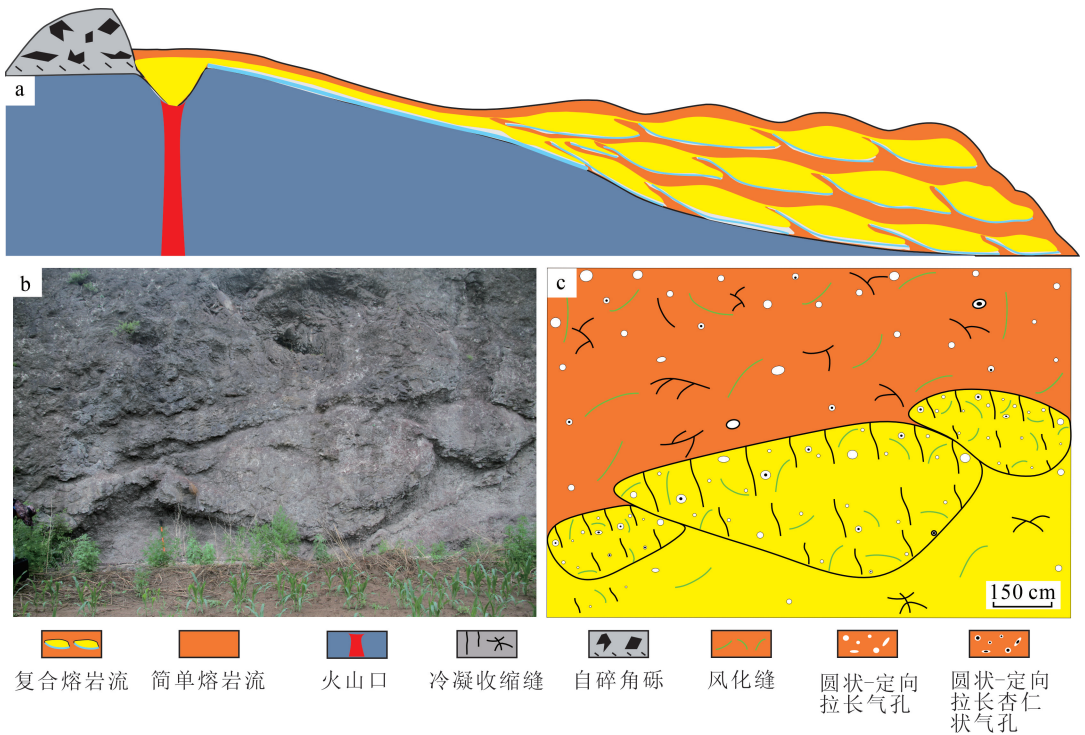
复合熔岩流又称瓣状熔岩流,主要由垛叶状熔岩交错无序叠置所形成,多为较易分出流动单元的盾状熔岩,熔岩流厚度一般较薄。通常在熔浆喷出速度较小的情况下形成^[62]。火山口附近可能存在垂向分布的自碎角砾,远源区域则以复合熔岩流微相为主体(图 11a)。

张宝吐地区露头发现的复合熔岩流微相发育大量的冷凝收缩缝和密集分布的气孔,气孔多为定向拉长状,部分气孔被方解石所填充形成气孔杏仁状。该地区识别出的岩性为块状气孔杏仁状安山岩,气孔直径为 0.5~10.0 mm。复合熔岩流微相可在野外剖面上观察到交错叠置的熔岩,熔岩表面发育冷

凝收缩缝、风化缝和气孔(部分杏仁状),上述现象在熔岩流顶部较为发育,自上而下逐渐减少,并在复合熔岩流上端发育简单熔岩流微相,整体纵横比中等(图 11b,c)。

3.2.2 水上喷发水下就位熔岩流亚相

水上喷发水下就位熔岩流是火山喷发的重要产物,主要由水上熔岩、枕状熔岩和玻质碎屑岩 3 部分构成,熔岩多为球枕状构造,流入水下的部分易形成扇状结构,熔岩流内部存在碳化物,整体纵横比中等^[63-65](图 12a)。辽西四方台地区义县组水上喷发水下就位熔岩流亚相(图 12b—d)中共识别出复合熔岩流和原地碎屑堆积两种微相,相序模式为横向上相序(复合熔岩流微相—原地碎屑堆积微相)。叠



a. 模式示意图,主要由垛叶状熔岩交错无序叠置所形成,火山口处发育自碎角砾,远源处以复合熔岩流微相为主^[10]; b. 张宝吐地区野外剖面,发育交错叠置的熔岩; c. 张宝吐宏观结构素描图,上部发育简单熔岩流微相。

图 11 辽西地区白垩系义县组喷溢相水上熔岩流亚相复合熔岩流微相模式图

Fig.11 Architecture of effusive facies subaerial lava flow subfacies composite lava flow microfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

置关系整体以原地碎屑堆积微相为主,复合熔岩流微相存在于原地碎屑堆积微相之中,并被原地碎屑堆积微相填充(图 12b、d)。上述微相叠置关系形成的原因可能是玻质碎屑岩先形成,并将水体与火山岩浆分离开,使得岩浆在玻质碎屑岩内部循环流动从而形成玄武安山岩^[65]。该区喷溢相水上喷发水下就位熔岩流亚相复合熔岩流微相的岩性主要以玄武安山岩为主,多呈球状、枕状和长条状等多种形态,原地碎屑堆积微相多以玻质碎屑岩为主。熔岩流内核球枕状熔岩发育的冷凝收缩缝由中心向四周密集扩散,呈放射状和碎裂状特点,靠近熔岩流表壳处放射状形态规则较为明显;熔岩流内核长条状熔岩发育的冷凝收缩缝具有近直立状排列和横向波浪状特点(图 12c、e)。在野外露头所采集的岩石样品中发现岩石内核和边缘部分存在碳化现象,其形成原因可能是火山爆发时气温急剧升高,炙热的岩浆将火山附近的物质包裹并燃烧,经过高温碳化作用后,物质内部的亲水因子被重组,降低了吸湿平衡点,导致亲水有机质在经历干馏作用后形成碳化产

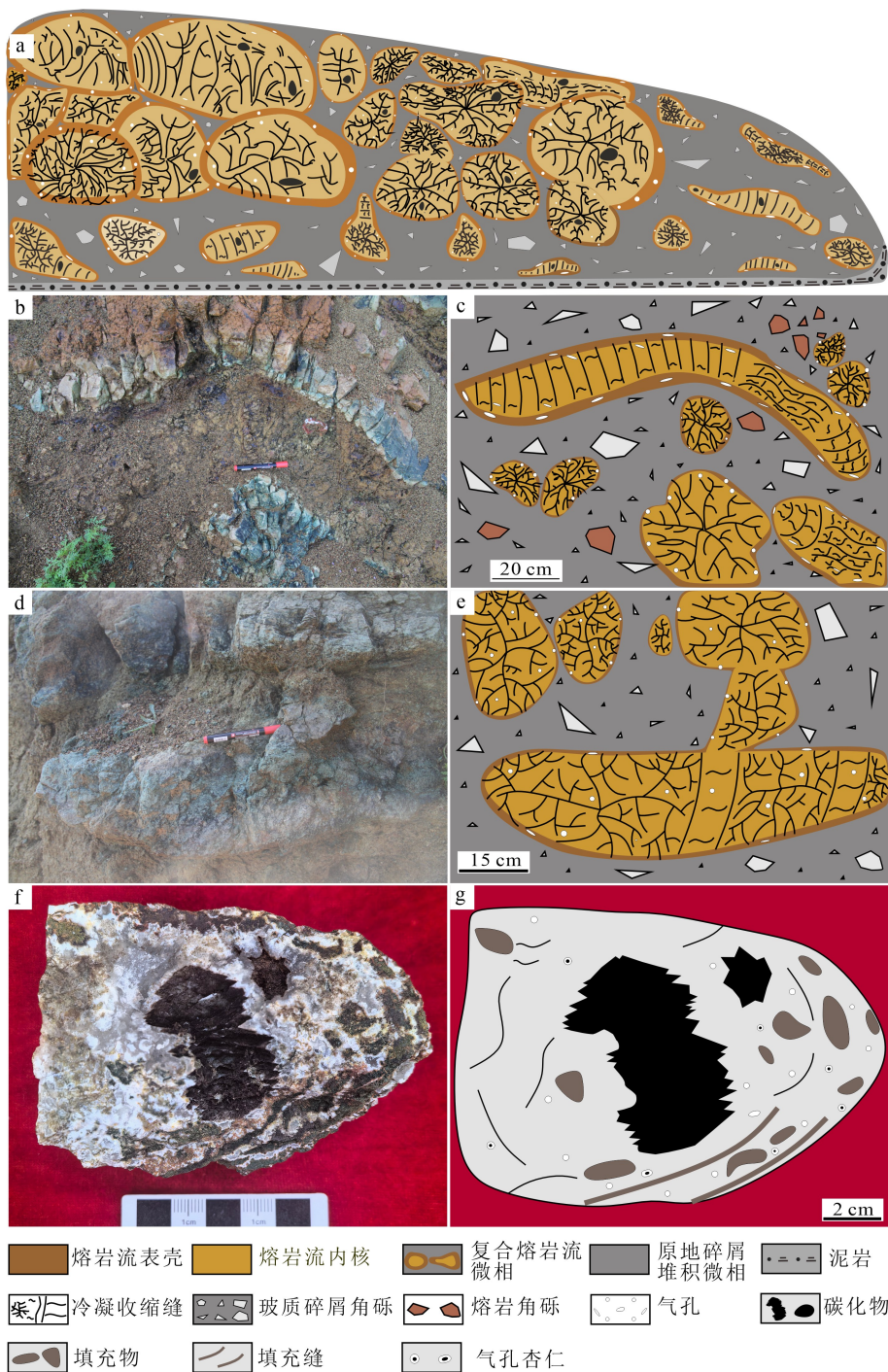
物。岩石表面发育大量直径为 1~3 mm 的气孔,部分气孔被火山灰等胶结物充填形成气孔杏仁(图 12f、g)。

3.3 侵出相

侵出相多指熔岩穹丘堆积单元,本研究区内识别出的侵出相为水上熔岩穹丘亚相内核微相。

熔岩穹丘(lava dome),又称“穹丘火山”,为火山熔浆形成的陡峭边状、圆形状的熔岩堆积经冷凝固结作用在火山喷出口上方和周围形成一个圆顶状或球状的熔岩,其通常分布于大型火山机构的火山口内部^[66]。

水上熔岩穹丘亚相可细分为内核微相、表壳微相和原地碎屑堆积微相(图 13a),其中内核微相通常发育在近火山口相带和近源相带附近,本文仅分析讨论在尖山地区识别出的内核微相。该地区识别出的岩性为块状安山岩,剖面上可见:穹丘顶部风化层发育溶蚀孔;中部发育规则状柱状节理、冷凝收缩缝和风化缝(图 13b、c);下部存在风化层节理,且延伸范围较大,发育不规则状柱状节理、冷凝收缩缝和



a. 模式示意图,纵横比中等^[65]; b. 四方台地区野外剖面,整体以原地碎屑堆积微相为主; c. 四方台地区宏观结构素描图,熔岩流内核熔岩的冷凝收缩缝呈放射状和碎裂状特点,熔岩流内核长条状熔岩发育的冷凝收缩缝具有近直立状排列和横向波浪状特点; d. 四方台地区野外剖面; e. 四方台地区宏观结构素描图; f. 四方台地区碳化物样品照片,表面发育气孔杏仁; g. 四方台地区碳化物宏观结构素描图,表面发育冷凝收缩缝和填充物。

图 12 辽西地区白垩系义县组喷溢相水上喷发水下就位熔岩流亚相模式图

Fig.12 Architecture of effusive facies subaqueous lava flow subfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

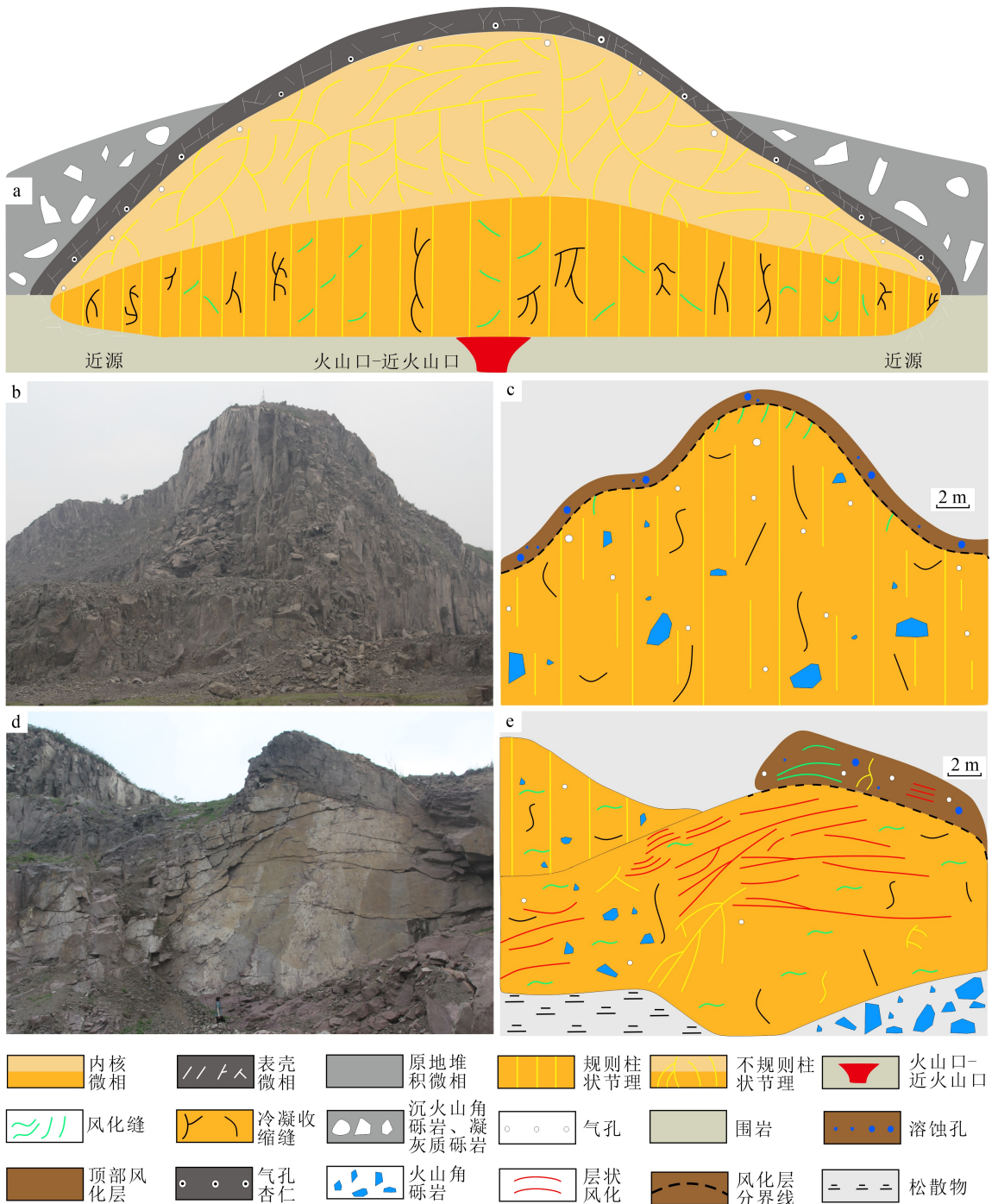


图 13 辽西地区下白垩统义县组侵入相水上熔岩穹丘亚相模式图

a. 水上熔岩穹丘亚相结构模式图^[10],分为内核微相、表壳微相和原地碎屑堆积微相; b,d. 尖山地区水上熔岩穹丘亚相内核微相野外剖面, b为穹丘顶部和中部,d为穹丘下部和底部; c,e. 尖山地区水上熔岩穹丘亚相内核微相宏观结构素描图,穹丘顶部发育溶蚀孔,中部发育冷凝收缩缝、风化缝和规则柱状节理,下部发育风化层节理、不规则柱状节理、冷凝收缩缝和老化缝,底部发育松散物和火山角砾岩,c为穹丘顶部和中部,e为穹丘下部和底部。

Fig.13 Architecture of extrusive facies lava dome above water subfacies of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

风化缝,冷凝收缩缝多为近直立状排列,呈高角度特点,长度为10 m,与风化缝交叉叠置;底部存在排列较为分散的火山角砾岩和松散物,相比穹丘中部和下部,底部的冷凝收缩缝较少,风化缝较多,气孔发育带较为密集(图13d、e)。剖面整体纵横比偏大,面缝率较大,表面存在方解石填充缝。剖面上较难发现明显的气孔发育,但可观察到细小的气孔杏仁残余;这说明除较为致密的安山岩之外,岩石表面可能遭受了较为强烈的风化淋滤作用,导致孔隙较为发育的岩石被侵蚀。

4 储层意义

辽西地区义县组火山岩发育丰富的原生孔隙和次生孔隙,具有较为良好的储层潜力。本文根据面孔率和面缝率分析结果,结合4类28型储集空间划分方案^[67],在辽西地区义县组识别出4类9小类孔隙,包括原生气孔(气孔),原生缝(冷凝收缩缝),次生溶蚀孔(铸模孔、筛状孔、晶内微孔、洞穴状孔和基质溶蚀微孔),次生裂缝(构造缝和溶蚀缝),其中前两类为原生孔缝,后两类为次生孔缝。下面以微相为单位详细介绍研究区内的储层特征。

辽西地区白垩系义县组面孔率(或面缝率)特征如图14所示。其中:热基浪亚相火山口-近火山口微相储集空间以次生溶蚀孔(77%)和次生裂缝(15%)为主,其次为原生气孔(8%),不发育冷凝收缩缝,储层类型主要为次生孔缝型(图14a);整体面孔率(或面缝率)较低(图14j)。热基浪亚相近源微相储集空间以次生溶蚀孔(75%)为主,其次为次生裂缝(14%)和气孔(11%),冷凝收缩缝不发育,储层类型主要为次生孔缝型(图14b);整体面孔率(或面缝率)中等偏高(图14j)。热基浪亚相远源微相储集空间主要为次生溶蚀孔(88%)和次生裂缝(12%),原生气孔和原生缝均不发育,储层类型主要为次生孔缝型(图14c);整体面孔率(或面缝率)低(图14j)。热碎屑流亚相火山口-近火山口微相储集空间以次生溶蚀孔(69%)为主,其次为原生气孔(17%)和次生裂缝(15%),不发育冷凝收缩缝,储层类型主要为次生孔缝型(图14d);整体面孔率(或面缝率)较高(图14j)。水上熔岩流亚相简单熔岩流微相储集空间以原生孔缝(53%)为主,次生溶蚀孔(47%)次之,不发育次生裂缝,储层类型主要为原生孔缝型(图14e);整体面孔率(或面缝率)较低(图

14j)。水上熔岩流亚相复合熔岩流微相储集空间以次生溶蚀孔(52%)和原生孔缝(38%)为主,次生裂缝(10%)较少,储层类型主要为原生和次生孔缝型(图14f);整体面孔率(或面缝率)较低(图14j)。水上喷发水下就位熔岩流亚相复合熔岩流微相储集空间以原生孔缝为主,对孔隙的贡献为原生气孔(66%)和原生缝(18%),发育少量的次生溶蚀孔和次生裂缝,储层类型主要为原生孔缝型(图14g);整体面孔率(或面缝率)较低(图14j)。水上喷发水下就位熔岩流亚相原地碎屑堆积微相储集空间以次生溶蚀孔(83%)为主,其次为次生裂缝(17%),不发育气孔和冷凝收缩缝,储层类型主要为次生孔缝型(图14h);整体面孔率(或面缝率)高(图14j),在本研究区所有微相中储层条件最好。水上熔岩穹丘亚相内核微相储集空间以次生溶蚀孔(71%)和次生裂缝(29%)为主,不发育原生孔缝,储层类型主要为次生孔缝型(图14i);整体面孔率(或面缝率)低(图14j)。

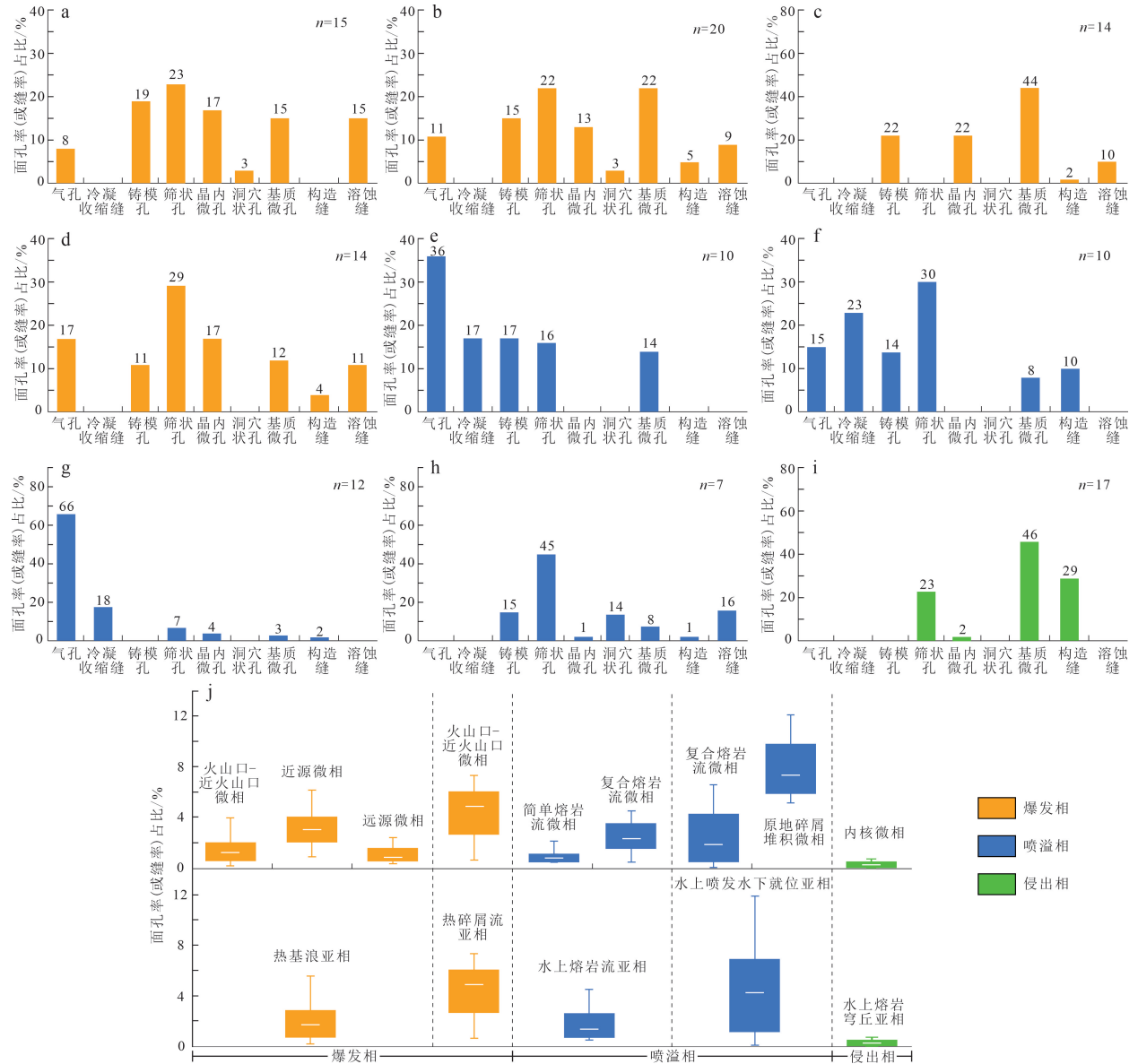
综上所述,由面孔率(或面缝率)结果可知,在辽西地区义县组识别的3种火山岩相的储层孔隙条件由好到差依次为爆发相(总面孔率(或面缝率)为155.45%)、喷溢相(总面孔率(或面缝率)为120.10%)、侵出相(总面孔率(或面缝率)为4.92%)。

由图14j可见:热碎屑流亚相火山口-近火山口微相的面孔率(或面缝率)高于热基浪亚相火山口-近火山口微相,故推测热碎屑流亚相的储层条件优于热基浪亚相;水上喷发水下就位熔岩流亚相的面孔率(或面缝率)大于水上熔岩流亚相,说明前者的储层条件优于后者;水上熔岩穹丘亚相的储层条件最差。在热基浪亚相中,近源微相储层条件最好,其次为火山口-近火山口微相,最后为远源微相,究其原因可能为:近源微相具有原生和次生孔缝占比高的特征,岩石粒度较粗且分选中等偏好(图8c),所以储层条件较好;火山口-近火山口微相粒度粗且分选一般(图8b),所以储层条件一般;远源微相分选较好,但由于粒度很细,不利于储集空间发育(图8d),所以储层条件较差。在水上熔岩流亚相中,复合熔岩流的储层条件好于简单熔岩流。水上喷发水下就位熔岩流亚相中,原地碎屑堆积微相储层性能优于复合熔岩流微相,并且可推测水上喷发水下就位熔岩流的前缘部分储层条件可能更好;这是由于复合熔岩流大量发育原生孔隙,较少发育次生孔隙,而原地碎屑堆积

微相不发育原生孔隙,只发育次生孔隙,且总面孔率(或面缝率)较大。水上喷发水下就位熔岩流亚相原地碎屑堆积微相在本研究区内储层条件最好,水上熔岩穹丘亚相内核微相储层条件最差,原因是其不发育气孔和冷凝收缩缝,只发育少量次生孔缝。

火山岩相的几何外形和内部结构对储地比和储层空间展布有着较好的映射关系,并具有一定的约束作用。本研究区内各亚相的平面外形可分为扇

状、环状和圆状,剖面外形分为板状、楔状和丘状,内部结构为层状、似层状和块状。由表 3 可知,渤海义县组所揭示的储地比由高到低依次为水上熔岩流亚相(19.11%)、热基浪亚相(18.00%)、热碎屑流亚相(12.13%)和水上熔岩穹丘亚相(6.39%)。分析可得辽西地区及渤海海域义县组地层中,平面外形为扇状,剖面外形为楔状,内部结构为似层状且剖面纵横比中等的岩相储层条件更好。



a. 热基浪亚相火山口-近火山口微相; b. 热基浪亚相近源微相; c. 热基浪亚相远源微相; d. 热碎屑流亚相火山口-近火山口微相; e. 水上熔岩流亚相简单熔岩流微相; f. 水上熔岩流亚相复合熔岩流微相; g. 水上喷发水下就位熔岩流亚相复合熔岩流微相; h. 水上喷发水下就位熔岩流亚相原地碎屑堆积微相; i. 水上熔岩穹丘亚相内核微相; j. 面孔率箱图。

图 14 辽西地区白垩统义县组面孔率(或面缝率)特征

Fig.14 Surface porosity characteristics of Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning

表 3 辽西地区及渤海义县组岩相特征与储层意义分析表

Table 3 Lithofacies characteristics and reservoir significance of Yixian Formation in western Liaoning and Bohai Sea

相	亚相	外形(平面)	外形(剖面)	内部结构	纵横比	储地比/%
爆发相	热基浪	环状	板状	层状	中	18.00
	热碎屑流	扇状	板状	似层状	小	12.13
喷溢相	水上熔岩流	扇状	楔状	似层状	中	19.11
	水上喷发水下就位熔岩流	扇状-圆状	楔状	似层状	中	暂无揭示
侵出相	水上熔岩穹丘	圆状	丘状	块状	大	6.39

注:表中暂无揭示的部分为测井中暂未解释的试油气段;储地比来源为渤海海域义县组测井资料。

在渤海湾盆地渤中凹陷钻井揭示的岩相中,喷溢相的储层条件最好^[68]。本研究区揭示的爆发相的面孔率(或面缝率)略优于喷溢相,与渤海湾盆地莱州湾凹陷所揭示岩相的储层条件相似^[14]。造成盆内盆缘存在差异性的原因是由于野外剖面揭示的岩相受几何外形、内部结构和纵横比的控制,纵横比大小均会影响储层物性的好坏,而钻井所揭示的爆发相因为埋深较大,压实作用强,使得岩石表面及内部的气孔和裂缝被压缩,影响储层条件。

5 结论

1)辽西义县组火山岩可分为火山碎屑岩、火山碎屑熔岩和熔岩三类。镜下鉴定结果表明:火山碎屑岩主要为集块岩、火山角砾岩、火山角砾凝灰岩和凝灰岩;火山碎屑熔岩主要为安山质角砾熔岩、流纹质角砾凝灰熔岩和流纹质凝灰熔岩;熔岩以玄武安山岩、安山岩、粗面岩、气孔流纹岩和玻质碎屑岩为主。岩性构成特征以及主量元素特征表明,研究区内火山岩以中性岩和酸性岩为主,基性岩占比较小。

2)义县组火山岩就位环境存在陆上和水上两种。识别出 3 相 5 亚相 9 微相,分别是爆发相热基浪亚相(包括火山口-近火山口、近源和远源微相)和热碎屑流亚相(包括火山口-近火山口微相),喷溢相水上熔岩流亚相(包括简单熔岩流和复合熔岩流微相)和水上喷发水下就位熔岩流亚相(包括复合熔岩流和原地碎屑堆积微相),侵出相水上熔岩穹丘亚相(内核微相)。将隐爆角砾岩划分为微相,建立了岩相模式。

3)面孔率(或面缝率)分析结果显示,本研究区内爆发相的储层最好,其次为喷溢相,侵出相最差。爆发相中,热碎屑流亚相火山口-近火山口微相的总面孔率(或面缝率)优于热基浪亚相火山口-近火山

口微相,故推测热碎屑流亚相的储层可能好于热基浪亚相,前者具有更好的储层潜力。喷溢相中,水上喷发水下就位熔岩流亚相的储层潜力好于水上熔岩流亚相。热基浪亚相中,近源微相储层优于火山口-近火山口微相和远源微相。水上喷发水下就位熔岩流亚相中,原地碎屑堆积微相的储层好于复合熔岩流微相,推测在水上喷发水下就位熔岩流前缘部分的储层可能会更好。水上喷发水下就位熔岩流亚相原地碎屑堆积微相在所识别出的 9 种微相里储层条件最好,而水上熔岩穹丘亚相内核微相储层条件最差。

参考文献(References):

- [1] 王璞珺,陈崇阳,张英,等.松辽盆地长岭断陷火山岩储层特征及有效储层分布规律[J].天然气工业,2015,35(8):10-18.
Wang Pujun, Chen Chongyang, Zhang Ying, et al. Characteristics of Volcanic Reservoirs and Distribution Rules of Effective Reservoirs in the Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 10-18.
- [2] 徐长贵,周家雄,杨海风,等.渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报,2024,45(1):163-182.
Xu Changgui, Zhou Jiaxiong, Yang Haifeng, et al. New Fields, New Types and Resource Potential of Oil-Gas Exploration in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 163-182.
- [3] 叶涛,牛成民,王清斌,等.渤海湾盆地大型基岩潜山储层特征及其控制因素:以渤中 19-6 凝析气田为例[J].地质学报,2021,95(6):1889-1902.
Ye Tao, Niu Chengmin, Wang Qingbin, et al. Characteristics and Controlling Factors of Large Bedrock Buried-Hill Reservoirs in the Bohai Bay Basin:

- A Case Study of BZ19-6 Condensate Field[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1889-1902.
- [4] 蔡冬梅,叶涛,鲁凤婷,等.渤海海域中生界火山岩岩相特征及其识别方法[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(1): 112-120.
Cai Dongmei, Ye Tao, Lu Fengting, et al. Lithofacies Characteristics and Identification Methods of Mesozoic Volcanic Rocks in Bohai Sea[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(1): 112-120.
- [5] 肖军, Kamaye T, 王华, 等.渤海湾盆地南堡凹陷火山岩特征及其有利成藏条件分析[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(1): 52-56.
Xiao Jun, Kamaye T, Wang Hua, et al. Characteristics of Igneous Rocks and Their Favorable Pool Forming Conditions in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(1): 52-56.
- [6] 王璞珺,迟元林,刘万洙,等.松辽盆地火山岩相:类型、特征和储层意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(4): 449-456.
Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Volcanic Facies of the Songliao Basin: Classification, Characteristics and Reservoir Significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4): 449-456.
- [7] 黄玉龙,单俊峰,边伟华,等.辽河拗陷中基性火成岩相分类及储集意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 671-680.
Huang Yulong, Shan Junfeng, Bian Weihua, et al. Facies Classification and Reservoir Significance of the Cenozoic Intermediate and Mafic Igneous Rocks in Liaohe Depression, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 671-680.
- [8] 衣健,唐华风,王璞珺,等.基性熔岩火山地层单元类型、特征及其储层意义[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(1): 149-158.
Yi Jian, Tang Huafeng, Wang Pujun, et al. Types, Characteristics and Reservoir Significance of Basic Lava Flow Units [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(1): 149-158.
- [9] 靳军,王剑,刘金,等.准噶尔盆地克一百断裂带石炭系深部岩性岩相及时空分布特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(2): 238-245.
Jin Jun, Wang Jian, Liu Jin, et al. Characteristic and Distribution of Lithology-Lithofacies of Deep Carboniferous Reservoirs in the Ke-Bai Fractured Zone of the Northwestern Margin in Junggar Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(2): 238-245.
- [10] 唐华风,边伟华,王璞珺,等.盆地火山岩相分类和模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(6): 1651-1671.
Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Classification and Mode of Volcanic Facies in the Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(6): 1651-1671.
- [11] Tang H F, Wang L L, Wu H C, et al. Possible Geological Interpretation of the Volcanic Seismic Facies Based on Volcanostratigraphy Elements: A Case Analysis of the Yingcheng Formation in the Changling Fault Depression, Songliao Basin, NE China[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 255: 211668.
- [12] 朱伟林,米立军,龚再升.渤海海域油气成藏与勘探[M].北京:科学出版社,2009.
Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng. Oil and Gas Accumulation and Exploration in Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [13] 刘中云,肖尚斌,姜在兴.渤海湾盆地第三系火山岩及其成因[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2001, 25(1): 22-26.
Liu Zhongyun, Xiao Shangbin, Jiang Zaixing. Volcanic Rocks of Bohai Bay Basin Intertart and Their Genesis [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2001, 25(1): 22-26.
- [14] 王海峰,户景松,邹明倬,等.渤海湾盆地莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩相模式和储层特征[J]. *地质学报*, 2024, 98(6): 1814-1828.
Wang Haifeng, Hu Jingsong, Zou Mingzhuo, et al. Mesozoic Volcanic Facies Model and Reservoir Characteristics in the Southern Slope of Laizhou Bay Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(6): 1814-1828.
- [15] 徐长贵,于海波,王军,等.渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 25-38.
Xu Changgui, Yu Haibo, Wang Jun, et al. Formation Conditions and Accumulation Characteristics of Bozhong 19-6 Large Condensate Gas Field in Offshore Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 25-38.
- [16] Ye Tao, Chen Anqing, Hou Mingcai, et al.

- Lithofacies Characteristics and Controlling on Volcanic Reservoirs in the Basement: A Case Study of the Offshore Bohai Bay Basin, Eastern China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 209: 109860.
- [17] 周家雄, 徐春强, 黄志, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷 BZ8-3S 大型构造规模型火山岩储层形成条件[J/OL]. *地球科学*. [2024-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002>.
- Zhou Jiexiong, Xu Chunqiang, Huang Zhi, et al. Enhanced Formation Conditions of the Large-Scale Volcanic Reservoir in the BZ8-3S Large Volcanic Structure in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J/OL]. *Earth Science*. [2024-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002>.
- [18] 胡志伟, 杨海风, 韩自军, 等. 渤海海域渤中 34-9 油田火山岩特征及其对油气成藏的控制作用[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(3): 208-218.
- Hu Zhiwei, Yang Haifeng, Han Zijun, et al. Characteristics of Volcanic Rocks and Their Control Actions on Hydrocarbon Accumulation of Bozhong 34-9 Oilfield in Bohai Sea [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(3): 208-218.
- [19] 叶涛, 韦阿娟, 祝春荣, 等. 渤海海域基底“改造型火山机构”特征及油气藏意义[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1370-1380, 1434.
- Ye Tao, Wei Ajuan, Zhu Chunrong, et al. Characteristics of “Modified Volcanic Mechanism” in Basement of Bohai Sea and Its Significance for Reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1370-1380, 1434.
- [20] 叶涛. 渤海湾盆地潜山油气藏形成条件及主控因素研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015: 1-83.
- Ye Tao. Study on Formation Conditions and Main Controlling Factors of Buried Hill Reservoirs in Bohai Bay Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015: 1-83.
- [21] 叶涛, 韦阿娟, 高坤顺, 等. 渤海海域中生界火山岩测井-地质岩性综合识别方法[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(1): 48-53.
- Ye Tao, Wei Ajuan, Gao Kunshun, et al. Logging Comprehensive Identification Method with Logging-Geology Data of Mesozoic Volcanic Rocks in Bohai Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(1): 48-53.
- [22] 谢玉洪, 罗小平, 王德英, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷西次洼中生界古潜山油气成藏过程[J]. *天然气工业*, 2019, 39(5): 15-24.
- Xie Yuhong, Luo Xiaoping, Wang Deying, et al. Hydrocarbon Accumulation of Composite-Buried Hill Reservoirs in the Western Subsag of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(5): 15-24.
- [23] 金春爽, 乔德武, 淡伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 19-29.
- Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Dan Weining. Mesozoic Volcanic Rock Distribution and Reservoir Characteristics in the Bohai Bay Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(1): 19-29.
- [24] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited [J]. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 177-202.
- [25] Yang F, Santosh M, Kim S W. Mesozoic Magmatism in the Eastern North China Craton: Insights on Tectonic Cycles Associated with Progressive Craton Destruction [J]. *Gondwana Research*, 2018, 60: 153-178.
- [26] 王宇林, 贾翠, 仲米山, 等. 辽西阜新地区义县组的喷发旋回特征 [J]. *地质学杂志*, 2012, 36(1): 116-124.
- Wang Yulin, Jia Cui, Zhong Mishan, et al. Characteristics of Volcanic Eruption Cycles in the Yixian Formation in the Fuxin Area, Western Liaoning[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2012, 36(1): 116-124.
- [27] 张斌. 松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 508-515.
- Zhang Bin. Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Patterns of Volcanic Rocks in the Yixian Formation Zhangqiang Depression, Southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 508-515.
- [28] 张立东, 杨雅君, 张立军. 辽西义县组-冀北大店子组火山-沉积地层对比研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 1-331.
- Zhang Lidong, Yang Yajun, Zhang Lijun. Comparison Research of the Volcanic-Sediment Strata Between the Yixian Formation from Western Liaoning and the Dadianzi Formation from Northern Hebei[M]. Wuhan: China University of Geosciences

- Press, 2016: 1 - 331.
- [29] 辽宁省区域地层表编写组. 东北地区区域地层表辽宁省分册[M]. 北京:地质出版社, 1978: 82 - 164.
Geological Strata Map Compilation Team of Liaoning Province. Regional Geological Strata Map of Northeast China-Liaoning Province Subvolume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 82 - 164.
- [30] Yang W, Li S G. Geochronology and Geochemistry of the Mesozoic Volcanic Rocks in Western Liaoning: Implications for Lithospheric Thinning of the North China Craton[J]. Lithos, 2008, 102 (1/2): 88 - 117.
- [31] 邢德和. 辽宁西部义县组地层及古地理特征[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 6 - 78.
Xing Dehe. Stratigraphy and Paleogeographic Characteristics of Yixian Formation in Western Liaoning Province[D]. Changchun: Jilin University, 2004: 6 - 78.
- [32] 张宏, 王五力, 李之彤, 等. 辽西北票和义县地区义县组综合对比研究[J]. 地质通报, 2004, 23(8): 766 - 777.
Zhang Hong, Wang Wuli, Li Zhitong, et al. Comprehensive Correlation Study of Yixian Formation in Beipiao and Yixian Area, Northwest Liaoning Province[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(8): 766 - 777.
- [33] 张亚楠. 北票—义县地区义县组沉积环境分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.
Zhang Yanan. Sedimentary Environment Analysis of Yixian Formation in Beipiao-Yixian Area [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.
- [34] 许江. 辽西北票—义县地区义县组地层对比研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
Xu Jiang. Stratigraphic Correlation Study of Yixian Formation in Beipiao-Yixian Area, Northwest Liaoning [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [35] 潘玉啟, 黄志安, 吴子杰, 等. 辽宁阜新地区义县组火山岩特征及喷发旋回划分[J]. 地质与资源, 2014, 23(1): 21 - 26.
Pan Yuqi, Huang Zhian, Wu Zijie, et al. Characteristics of Volcanic Rocks and Division of Eruption Cycles of the Yixian Formation in Fuxin, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(1): 21 - 26.
- [36] 李晓波, 王旖旎, 梁琛岳, 等. 辽西南部中生代地层序列及特征 [J]. 地层学杂志, 2020, 44(3): 299 - 309.
Li Xiaobo, Wang Yini, Liang Chenyue, et al. Mesozoic Stratigraphic Sequence and Characteristics in Southern Western Liaoning Province, Northeast China[J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44 (3): 299 - 309.
- [37] 张立军, 高克勤, 王丽霞. 辽西义县组蝶螈类化石新发现[J]. 地质通报, 2004, 23(8): 799 - 801.
Zhang Lijun, Gao Keqin, Wang Lixia. New Discovery of Salamander Fossils from the Yixian Formation in Western Liaoning[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(8): 799 - 801.
- [38] 杨庚, 柴育成, 吴正文. 燕山造山带东段—辽西地区薄皮逆冲推覆构造[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 322 - 332.
Yang Geng, Chai Yucheng, Wu Zhengwen. Thin-Skinned Thrust Nappe Structures in Western Liaoning in the Eastern Sector of the Yanshan Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (3): 322 - 332.
- [39] 贾建亮, 吴彦佳, 杨帝, 等. 阜新盆地早白垩世火山成因古潜山油气藏的发现及成藏机制[J]. 地质学报, 2022, 96(11): 3977 - 3993.
Jia Jianliang, Wu Yanjia, Yang Di, et al. Discovery and Accumulation Mechanism of Early Cretaceous Volcanogenic Buried-Hill Reservoir in the Fuxin Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(11): 3977 - 3993.
- [40] 朱日祥, 邵济安, 潘永信, 等. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动[J]. 科学通报, 2002, 47(17): 1335 - 1340.
Zhu Rixiang, Shao Ji'an, Pan Yongxin, et al. Paleomagnetic Determination and Intracontinental Rotation of Cretaceous Volcanic Rocks in Western Liaoning [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (17): 1335 - 1340.
- [41] 蔡厚安, 徐德斌, 李宝芳, 等. 辽西早白垩世火山岩喷发期次及同位素年代学研究[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(12): 1 - 6.
Cai Houan, Xu Debin, Li Baofang, et al. A Study on Early Cretaceous Volcanic Effusion Periods and Isotope Chronology in Western Liaoning [J]. Coal Geology of China, 2010, 22(12): 1 - 6.
- [42] 张招崇, 李兆鼎, 王富宝, 等. 辽西义县盆地火山岩的基本特征及其成因探讨[J]. 现代地质, 1994, 8(4): 441 - 451.
Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Wang Fubao, et al.

- Essential Characteristics of Volcanic Rocks and Discussion on Their Genesis in Yixian Basin, Western Liaoning[J]. *Geoscience*, 1994, 8(4): 441 - 451.
- [43] 张宏, 柳小明, 陈文, 等. 辽西北票一义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. *中国地质*, 2005, 32(4): 596 - 603.
- Zhang Hong, Liu Xiaoming, Chen Wen, et al. The Age of the Top of the Yiyuan Formation in Beipiao-Yixian Area, Western Liaoning, and Its Importance [J]. *Geology in China*, 2005, 32(4): 596 - 603.
- [44] 李晓海, 陈树旺, 丁秋红, 等. 辽宁北部秀水盆地地下白垩统义县组火山岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2020, 39(5): 659 - 669.
- Li Xiaohai, Chen Shuwang, Ding QiuHong, et al. LA - ICP - MS Zircon U - Pb Age of the Volcanic Rocks of the Lower Cretaceous Yixian Formation in the Xiushui Basin of Northern Liaoning Province and Its Geological Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 659 - 669.
- [45] Middlemost E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215 - 224.
- [46] Zhang C, Quan J Y, Zhang Y J, et al. Late Mesozoic Tectonic Evolution of the Southern Great Xing'an Range, NE China: Evidence from Whole-Rock Geochemistry, and Zircon U - Pb Ages and Hf Isotopes from Volcanic Rocks[J]. *Lithos*, 2020, 362/363: 1 - 18.
- [47] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用: 以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 382 - 389.
- Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. Application of Trace Element Analysis in Distinguishing Sedimentary Medium Environments; A Case Study of the Late Triassic in the Central Area of Western Ordos Basin[J]. *Geology of China*, 2012, 39(2): 382 - 389.
- [48] 单玄龙, 李吉焱, 陈树民, 等. 陆相水下火山喷发作用及其对优质烃源岩形成的影响: 以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2637 - 2644.
- Shan Xuanlong, Li Jiyan, Chen Shumin, et al. Subaqueous Volcanic Eruptions in Continental Facies and Their Influence on High Quality Source Rocks Shown by the Volcanic Rocks of a Faulted Depression in Northeast China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(12): 2637 - 2644.
- [49] 单玄龙, 牟汉生, 刘玉虎, 等. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义: 以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 719 - 730.
- Shan Xuanlong, Mu Hansheng, Liu Yuhu, et al. Subaqueous Volcanic Eruptive Facies, Facies Model and Its Reservoir Significance in a Continental Lacustrine Basin: A Case from the Cretaceous in Chaganhua Area of Southern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 719 - 730.
- [50] 张艳, 舒萍, 王璞珺, 等. 陆上与水下喷发火山岩的区别及其对储层的影响: 以松辽盆地营城组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 37(6): 1259 - 1265.
- Zhang Yan, Shu Ping, Wang Pujun, et al. Comparison Between Subaerial and Subaqueous Volcanic Rocks and the Reservoir Significance: Taking Yingcheng Formation in Songliao Basin as Example [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 37(6): 1259 - 1265.
- [51] 伍宏美, 陈亚军, 孟鹏飞, 等. 火山岩陆上与水下喷发环境的氧化系数判别方法[J]. *沉积学报*, 2022, 40(3): 599 - 615.
- Wu Hongmei, Chen Yajun, Meng Pengfei, et al. Discrimination Method of Oxidation Index of Volcanic Rock in Land and Underwater Eruption Environments [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(3): 599 - 615.
- [52] 刘德成, 陈亚军, 伍宏美, 等. 陆上和水下喷发成因火山岩特征及元素地球化学判别: 以新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩为例[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(6): 41 - 51.
- Liu Decheng, Chen Yajun, Wu Hongmei, et al. Characteristics and Element Geochemical Discrimination of Subaerial and Subaqueous Volcanic Rocks: Taking the Upper Carboniferous Volcanic Rocks of Malang Depression in Santanghu Basin in Xinjiang as an Example [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(6): 41 - 51.
- [53] 单玄龙, 邹玉洁, 衣健, 等. 盆地火山岩相研究进展: 基性火山熔岩及水下喷发火山岩相新成果[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3): 721 - 734.
- Shan Xuanlong, Zou Yujie, Yi Jian, et al. Progress of Basin Volcanic Facies: New Results of Intermediate-Mafic Volcanic Lava and Volcanic Facies

- of Subaqueous Eruption [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 721 - 734.
- [54] 王璞珺, 侯启军, 刘万洙, 等. 松辽盆地深层火山岩储层岩相特征和天然气的来源[J]. 世界地质, 2007, 26(3): 319 - 325.
Wang Pujun, Hou Qijun, Liu Wanzhu, et al. Characteristics of Volcanic Facies and Genesis of Natural Gases in Deep Songliao Basin, NE China[J]. Global Geology, 2007, 26(3): 319 - 325.
- [55] Wang P J, Chen S M. Cretaceous Volcanic Reservoirs and Their Exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499 - 523.
- [56] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 805 - 812.
Wang Pujun, Wu Heyong, Pang Yanming, et al. Volcanic Facies of the Songliao Basin: Sequence, Model and the Quantitative Relationship with Porosity & Permeability of the Volcanic Reservoir [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(5): 805 - 812.
- [57] Tang H F, Zhao X Y, Liu X, et al. Filling Characteristics, Reservoir Features and Exploration Significance of a Volcanostratigraphic Sequence in a Half-Graben Basin: A Case Analysis of the Wangfu Rift Depression in Songliao Basin, NE China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104 - 128.
- [58] 地球科学大辞典编委会. 地球科学大辞典[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1 - 1173.
Editorial Committee of Geosciences Dictionary. Geosciences Dictionary [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1 - 1173.
- [59] Neyendorf K K E, Mehl Jr J P, Jackson J A. Glossary of Geology [M]. 5th ed. Alexandria: American Geosciences Institute, 2011: 1 - 3587.
- [60] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic Rocks[M]. Heidelberg: Springer, 1984: 59 - 265.
- [61] Lockwood J P, Hazlett R W. Volcanoes: Global Perspectives [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2010: 1 - 539.
- [62] Walker G P L. Compound and Simple Lava Flows and Flood Basalts[J]. Bulletin Volcanologique, 1971, 35(6): 579 - 590.
- [63] Watton T J, Wright K A, Jerram D A, et al. The Petrophysical and Petrographical Properties of Hyaloclastite Deposits: Implications for Petroleum Exploration[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(3): 449 - 463.
- [64] 唐华风, 王寒非, Ben K, 等. 水下喷发火山碎屑岩储层特征及主控因素: 以新西兰 Taranaki 盆地中新世 Kora 火山为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 375 - 387.
Tang Huafeng, Wang Hanfei, Ben K, et al. Characteristics and Controlling Factors of Reservoirs of Subaqueous Pyroclastic Rocks: An Analysis of the Miocene Kora Volcano in the Taranaki Basin, New Zealand[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 375 - 387.
- [65] 张莹, 刘志峰, 朱文奇, 等. 水下就位熔岩流相结构模式和储层意义: 以义县地区白垩系义县组为例[J]. 世界地质, 2024, 43(2): 255 - 262.
Zhang Ying, Liu Zhifeng, Zhu Wenqi, et al. Facies Architecture and Reservoir Significances of Subaqueous Lava Flow: A Case Study of Cretaceous Yixian Formation in Yixian Area[J]. World Geology, 2024, 43(2): 255 - 262.
- [66] Peterson D W, Tilling R I. Lava Flow Hazard[M]// Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic Press, 2000: 957 - 971.
- [67] 唐华风, 王璞珺, 边伟华, 等. 火山岩储层地质研究回顾[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1744 - 1773.
Tang Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Review of Volcanic Reservoir Geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1744 - 1773.
- [68] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及主控因素[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 48 - 57.
Wang Chenjie, Zhang Xintao, Xu Chunqiang, et al. Development Characteristics and Main Controlling Factors of Mesozoic Volcanic Reservoirs in Northern Bozhong Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 48 - 57.